



COMOTI
ROMANIAN RESEARCH &
DEVELOPMENT INSTITUTE FOR
GAS TURBINES



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Școala Doctorală de Inginerie Aerospațială

Științe Inginerești, Inginerie Aerospațială

TEZĂ DE DOCTORAT

rezumat

Contribuții numerice și experimentale cu privire la metoda pasivă de control al curgerii cu placă perforată aplicată difuzoarelor paletate ale microturbomotoarelor

Numerical and experimental contributions on perforated plate passive flow control technique applied to vaned diffusers for microgas turbines

Doctorand: **Ing. Mihnea Gall**

Conducător de doctorat: **Prof. dr. ing. Daniel-Eugeniu Crunțeanu**

București, 2025



COMOTI
ROMANIAN RESEARCH &
DEVELOPMENT INSTITUTE FOR
GAS TURBINES



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Școala Doctorală de Inginerie Aerospațială

Științe Inginerești, Inginerie Aerospațială

TEZĂ DE DOCTORAT

rezumat

Contribuții numerice și experimentale cu privire la metoda pasivă de control al curgerii cu placă perforată aplicată difuzoarelor paletate ale microturbomotoarelor

Numerical and experimental contributions on perforated plate passive flow control technique applied to vaned diffusers for microgas turbines

Doctorand: **Ing. Mihnea Gall**

Conducător de doctorat: **Prof. dr. ing. Daniel-Eugeniu Crunțeanu**

Comisia de doctorat

Președinte	Prof. dr. ing. Teodor Lucian Grigorie	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Conducător de doctorat	Prof. dr. ing. Daniel-Eugeniu Crunțeanu	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Referent		
Referent		
Referent		

București, 2025

CUPRINS

LISTĂ DE FIGURI.....	II
CAPITOLUL 1 MOTIVAREA TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI	1
1.1 Analiza pieței microturbomotoarelor	1
1.2 Metode de control al curgerii	3
1.3 Obiectivele tezei	6
1.4 Metodologie	8
CAPITOLUL 2 REZUMATUL LUCRĂRII.....	11
CAPITOLUL 3 CONCLUZII	28
3.1 Concluzii generale și elemente de noutate	28
3.2 Contribuții personale	29
PUBLICAȚII ȘI PROIECTE DE CERCETARE.....	34
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	36

LISTĂ DE FIGURI

Fig. 1-1 Densitatea de energie – microturbomotoare vs baterii [4]	1
Fig. 1-2 Valori de referință pentru puterea specifică [4].....	1
Fig. 1-3 Microturbomotorul BMT120KS [5].....	2
Fig. 1-4 Schema generală a unui compresor centrifugal pentru microturbomotoare [5].....	2
Fig. 1-5 Metode pasive de control al undelor de șoc pe profile aerodinamice [15].....	4
Fig. 1-6 Metodă de control pasiv al undei de șoc - schiță [17]	5
Fig. 1-7 Grosimea stratului limită [17].....	5
Fig. 1-8 Metodă de control pasiv al undei de șoc [25]	5
Fig. 1-9 Comparatie numeric vs experimental pentru curgerea într-un ajutoraj	6
Fig. 1-10 Schema de lucru.....	8
Fig. 2-1 Corelație statistică de anteproiectare - Diametru vs Forța de propulsie	11
Fig. 2-2 Geometria de referință a difuzorului paletat de microturbomotor.....	12
Fig. 2-3 Gradientul densității – 50% din înălțimea canalului	12
Fig. 2-4 Profile fabricate aditiv din PLA -multiple diametre ale găurilor plăcii perforate	14
Fig. 2-5 Profil fabricat prin tăiere cu jet de apă ce conține o placă perforată de Aluminu	14
Fig. 2-6 Comparatie între rezultatele experimentale și cele numerice	14
Fig. 2-7 Distribuția presiunii statice pe peretele inferior al tunelului aerodinamic.....	15
Fig. 2-8 Profile fabricate aditiv - multiple dimensiuni ale orificiilor plăcii perforate	15
Fig. 2-9 Profil fabricat aditiv din PLA cu orificii de 0.5 mm pe placa perforată – detaliu.....	15
Fig. 2-10 Simulare numerică.....	16
Fig. 2-11 Imagini Schlieren.....	17
Fig. 2-12 Distribuția de presiune statică pe profilul 2.....	17
Fig. 2-13 Comparatie calitativă între rezultatele numerice și experimentale.....	18
Fig. 2-14 Procedura de liniarizare a difuzorului paletat inelar.....	18
Fig. 2-15 Rețea liniară care înglobează difuzorul paletat liniarizat	19
Fig. 2-16 Gradientul densității în regiunea rețelei de palete – referință (fără control pasiv) ...	19
Fig. 2-17 Vedere descompusă a rețelei liniare	20
Fig. 2-18 Paletele liniarizate de difuzor pe parcursul procesului de fabricație	21
Fig. 2-19 Paletele în urma frezării pentru controlul rugozității.....	22
Fig. 2-20 Paletele cu control pasiv montate pe fereastra de access optic din cuarț	22
Fig. 2-21 Paletele rețelei de difuzor și suruburile de ghidare și montaj.....	22
Fig. 2-22 Schema de instrumentare a instalației experimentale	22
Fig. 2-23 Vedere laterală a rețelei liniare în zona de access optic	23
Fig. 2-24 Sistem Schlieren pentru vizualizarea curgerii	23
Fig. 2-25 Vedere de ansamblu a rețelei.....	23
Fig. 2-26 Imagini Schlieren – 0.7 bar presiune statică relativă la intrare	24
Fig. 2-27 Imagini Schlieren – 0.8 bar presiune statică relativă la intrare	24
Fig. 2-28 Imagini Schlieren – 0.85 bar presiune statică relativă la intrare	24
Fig. 2-29 Imagini Schlieren – 0.9 bar presiune statică relativă la intrare	25
Fig. 2-30 Mărimi măsurate experimental pentru cazul 0.8 bar presiune statică relativă	25
Fig. 2-31 Domeniul de calcul.....	26
Fig. 2-32 Gradientul densității – plan la 50% din înălțimea canalului.....	26

Fig. 2-33 Structura undelor de șoc – prima paletă secundară	27
Fig. 2-34 Structura undelor de șoc – a doua paletă principală	27
Fig. 3-1 Creșterea nivelului de maturitate tehnologică (TRL)	31

CAPITOLUL 1 MOTIVAREA TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI

1.1 Analiza pieței microturbomotoarelor

În ultimele decenii, numeroase cercetări s-au concentrat asupra microturbomotoarelor (MGT), cu scopul de a îmbunătăți metodele de proiectare pentru o creștere a performanței. Preocupările tot mai mari cu privire la emisiile de gaze cu efect de seră au determinat țările din întreaga lume să pună în aplicare reglementări stricte menite să producă energie cu un impact din ce în ce mai redus asupra mediului. În Europa, implementarea cu succes a Pactului Verde European propune obținerea unor emisii nete de gaze cu efect de seră aproape nule până în 2050 [1]. Cu aceste strategii mondiale, se anticipează că piața microturbomotoarelor va fi propulsată cu peste 35 de milioane de dolari până în 2030, comparativ cu cifra de 26 de milioane de dolari raportată în 2021 [2]. Aplicațiile țintă pentru microturbomotoare sunt adesea selectate pe baza caracteristicilor lor de densitate ridicată de energie și putere, care sunt solicitate de clienții de pe piața vehiculelor aeriene fără pilot (UAV) sau din industria de generare a energiei [3].

Având în vedere progresele tehnologice recente în domeniul bateriilor și pilelor de combustie, microturbomotoarele trebuie să posede mai multe caracteristici care să atragă utilizatorii finali, din punct de vedere financiar și operațional. Microturbomotoarele au dovedit flexibilitate și fiabilitate în mediile de operare. Cu toate acestea, unul dintre principalele avantaje raportate în literatura de specialitate pentru microturbomotoare este potențialul de densitate energetică ridicată [4]. Cu o eficiență globală redusă a sistemului, raportul putere/greutate pentru un turbomotor este în continuare mai mare în comparație cu tehnologia bateriilor existentă în prezent, după cum se arată și în Fig. 1-1. Chiar dacă hidrogenul prezintă cea mai mare densitate energetică, implementarea sa în microturbomotoare este încă un domeniu activ de cercetare, în principal din cauza densității sale scăzute (și a necesității de a-l utiliza ca agent criogenic pentru a reduce volumul sistemului, în special pentru aplicațiile din industria aeronautică) și a considerentelor de siguranță. Pe lângă densitatea energetică, microturbomotoarele prezintă, de asemenea, o putere specifică mai mare în comparație cu bateriile, după cum se rezumă și în Fig. 1-2.

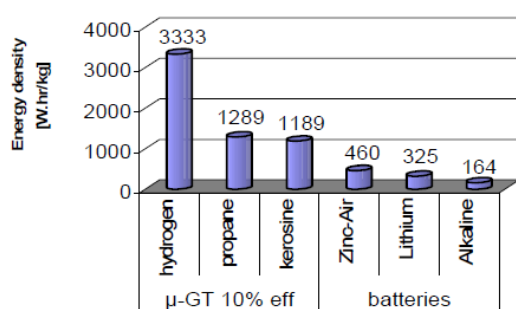


Fig. 1-1 Densitatea de energie – microturbomotoare vs baterii [4]

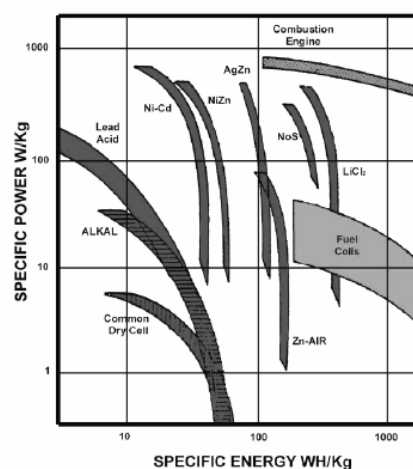


Fig. 1-2 Valori de referință pentru puterea specifică [4]

Similar turbomotoarelor de mari dimensiuni, microturbomotoarele sunt compuse din cinci componente principale (Fig. 1-3): dispozitiv de admisie, compresor, cameră de ardere, turbină și ajutoraj. De obicei, microturbomotoarele sunt proiectate cu compresoare centrifugale radiale sau mixte cu o singură treaptă, deoarece acestea sunt caracterizate de o lungime mai mică, un cost mai scăzut și o proiectare simplificată în comparație cu compresoarele axiale. În plus, compresoarele centrifugale sunt capabile să producă un raport de comprimare mai ridicat în configurația cu o singură treaptă și prezintă o diagramă de funcționare mai largă, caracterizată prin curbe de izoturație mai plate. De asemenea, compresoarele centrifugale au o rezistență mai mare la impactul obiectelor străine, contribuind la creșterea fiabilității și la prelungirea duratei de viață [6]. În plus, treptele centrifugale prezintă o adaptare mai bună la variația condițiilor la admisie.

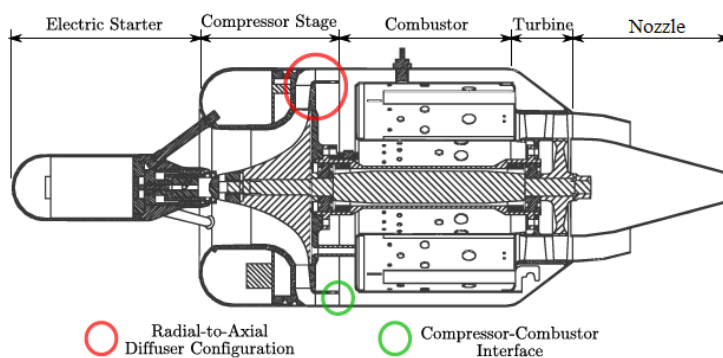


Fig. 1-3 Microturbomotorul BMT120KS [5]

În mod tradițional, o treaptă de compresor centrifugal utilizată în microturbomotoare are următoarele componente pe fluxul de curgere intrare-ieșire: un rotor, un difuzor nepaletat, un difuzor paletat radial, o tranziție radial-axială fără palete de 90° și o rețea cu scop de axializare a curgerii (Fig. 1-4). Constrângerile legate de aria frontală a microturbomotoarelor au un impact direct asupra diametrului compresoarelor, ceea ce ar putea limita performanța acestora, în special în partea de difuzie. Pentru a atinge niveluri ridicate de difuzie, sunt necesare difuzoare compacte și eficiente, deoarece extinderea radială este limitată de constrângerile de suprafață frontală menționate mai sus. Sistemele de comprimare pentru aplicații aeronautice, cum ar fi aeronavele fără pilot, necesită un raport de comprimare ridicat, un randament ridicat, un diametru frontal redus și o greutate și complexitate reduse. Deoarece aceste cerințe sunt contradictorii, sunt necesare eforturi de cercetare pentru a avansa nivelul tehnologic al sistemelor de comprimare noi și foarte competitive pentru piața microturbomotoarelor.

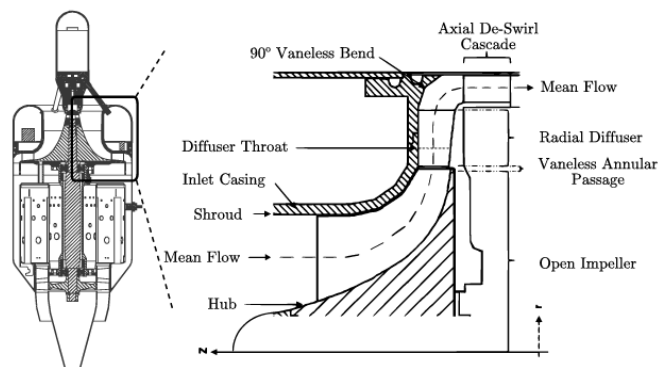


Fig. 1-4 Schema generală a unui compresor centrifugal pentru microturbomotoare [5]

1.2 Metode de control al curgerii

Performanța compresoarelor centrifugale este adesea evaluată în funcție de raportul de comprimare total, raportul de comprimare total-static, randamentul izentropic sau domeniul de debite de funcționare. În funcție de aplicația specifică, ponderea relativă a acestor criterii este diferită, conducând la o soluție optimă. În general, pentru treptele cu raport de comprimare ridicat și randament ridicat, difuzoarele cu palete sunt utilizate în cadrul treptelor centrifugale. Cu toate acestea, difuzoarele cu palete limitează domeniul de funcționare stabil, spre deosebire de cele fără palete, care sunt mai puțin performante, dar nu prezintă dezavantajul menționat anterior. Astfel, apariția instabilităților aerodinamice în difuzoarele cu palete la debite mici sau apariția blocajului la debite mari limitează puternic domeniul de funcționare stabil al unei trepte de compresor centrifugal. Pentru a atenua aceste efecte nedorite, diverse soluții de proiectare sunt utilizate și aplicate.

Limitarea domeniului de funcționare stabil este cauzată de fenomene de curgere complexe, cum ar fi undele de șoc, desprinderea stratului limită, interacțiunea undă de șoc - strat limită (SBLI), curgerile la vârf sau curgerile secundare. Tiainen [7] a efectuat un studiu comparativ între diferite metode active și pasive de control al curgerii pentru a îmbunătăți domeniul de funcționare stabil. În literatura de specialitate se găsesc diferite soluții de control activ sau pasiv care constau în materiale perforate sau poroase fie pe butucul, fie pe învelișul difuzorului cu palete, cu scopul final de a extinde domeniul de funcționare, concentrându-se în special pe regimurile cu debite mici. Skoch [8] a studiat o metodă activă bazată pe injecția de aer în butucul difuzorului cu palete, utilizând unghiuri de injecție diferite pentru orificiile de injecție (acestea au fost plasate în amonte de bordul de atac al paletelor). Rezultatele au arătat o îmbunătățire a limitei de pompaj folosind debite de injecție scăzute sau chiar injecție zero, corespunzătoare unei soluții pasive. Galloway [9][10] a studiat posibilitatea recirculării fluidului în difuzorul cu palete prin intermediul diferitelor configurații de cavități (fie cavități independente pentru fiecare canal, fie cavități comune pentru întregul difuzor cu palete), fie pe suprafața butucului, fie pe carcasă. Cu strategia de recirculare aplicată pe butuc, s-a obținut o creștere cu 58% a domeniului de funcționare stabil pentru rapoarte de comprimare ridicate.

Limitarea domeniului de funcționare stabilă la debite mari, și anume blocajul, este asociată cu undele de șoc, precum și cu interacțiunea acestora cu stratul limită. Desprinderea stratului limită ca urmare a interacțiunii cu undele de șoc limitează zona efectivă de curgere, ceea ce duce la un blocaj mai rapid. În plus, undele de șoc și interacțiunea acestora cu stratul limită cauzează pierderi totale de presiune. Metodele de creștere a performanței în aceste regimuri cu debite mari sunt legate de reducerea intensității undelor de șoc prin modificări ale tipului și structurii undelor de șoc, cu scopul final de a limita influența acestora asupra stratului limită și, în cele din urmă, de a debloca canalul de curgere. În literatura științifică, diferite studii au încercat să modifice configurația undelor de șoc. Aceste studii au fost efectuate mai întâi pe aerodinamică externă [11] (de exemplu, profile aerodinamice izolate) și ulterior pe dispozitive de admisie [12], ajutaje [13] și tuburi de șoc [14].

Lee [15] prezintă câteva metode de control pasiv pentru oscilațiile induse de undele de șoc pentru curgerea pe în jurul unui profil aerodinamic (Fig. 1-5). Aceste metode se bazează pe o cavitare plasată sub un material poros/perforat care permite recircularea fluidului [16]. Astfel, creșterea presiunii statice în aval de unda de șoc conduce la o aspirație spre regiunea cavității și la o injecție ulterioară în amonte de unda de șoc. Astfel, se creează un efect de obstacol fluidic

vâscos care permite formarea unei unde de șoc oblice. Cu toate acestea, o undă normală remanentă este încă prezentă, undă care intersectează unda de șoc oblică în așa-numitul „punct triplu”. În comparație cu unda de șoc normală inițială, noua structură de șoc oblică de tip „ λ ” se caracterizează printr-o intensitate mai mică, pierderi reduse de presiune totală induse de undă și o atenuare a efectului de desprindere a stratului limită indus de unda de șoc (Fig. 1-6) [17]. Din punct de vedere experimental, prezența structurii de șoc de tip „ λ ” este confirmată de un platou în distribuția presiunii statice la peretele corespunzător regiunii de control. Aspirația din aval de unda de șoc, cauzată de introducerea cavității, are, de asemenea, scopul de a menține curgerea atașată [18][19]. În general, recircularea fluidului în interiorul cavității nu numai că modifică structura undei de șoc tari, normale, inițiale, dar îi schimbă și poziția, locul de atașare coincidând cu marginea anterioară a regiunii de control [20]. Cu toate acestea, efectul de injecție din cavitate afectează stratul limită, conducând la valori mai mari ale grosimii de impuls, în special în partea din spate a regiunii de control. Perturbarea profilelor de viteză conduce, de asemenea, la o creștere a nivelului de turbulență în curgere.

Apare o idee general acceptată în literatură, și anume dimensiunile cavității trebuie optimizate astfel încât aspirația și injecția fluidului în curgerea principală să fie optime, fără o îngroșare excesivă a stratului limită (Fig. 1 7). Studii parametrice pot lua în considerare dimensiunea cavității (adâncime, lungime [21]), poziția relativă a cavității față de punctul inițial de ancorare a undei de șoc, precum și gradul de porozitate dictat de dimensiunea orificiilor și de spațiul dintre acestea. Recomandările din studiile anterioare restricționează lungimea regiunii de control a plăcii perforate la 70 mm [22] pentru a limita așa-numita “rezistență de excrescență” introdusă de orificii. Înclinarea orificiului a fost, de asemenea, studiată, prima jumătate a regiunii de control conținând orificii înclinate la 30° sau 45°, orientate către amonte sau aval. Pentru a doua parte a plăcii perforate, au fost utilizate găuri normale la suprafață [22]. Pentru orificiile înclinate au fost raportate mai puține perturbații și profiluri de viteză mai pline corespunzătoare unei energii mai ridicate în curgere. A fost obținută o reducere a rezistenței la înaintare pentru o geometrie simplă de arc utilizând orificii orientate în amonte cu o porozitate de 1-2% [23].

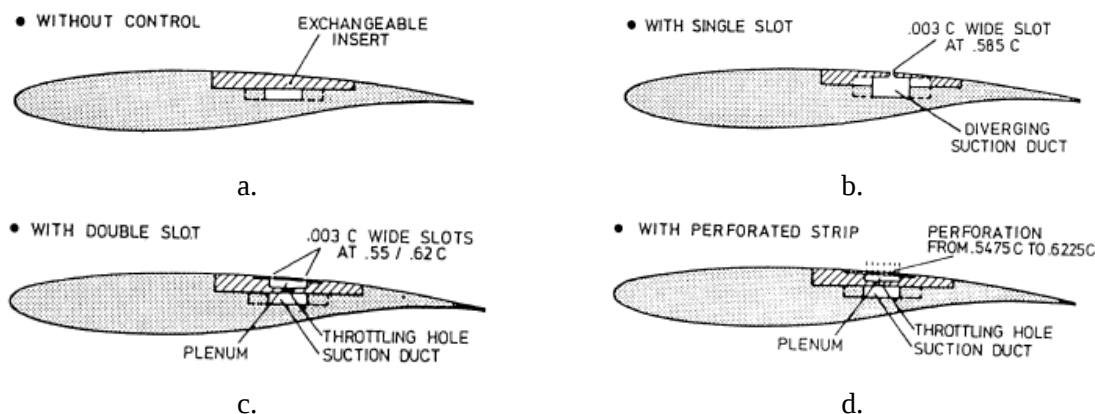


Fig. 1-5 Metode pasive de control al undelor de șoc pe profile aerodinamice [15]

- a. Profil de referință b. Profil cu fantă unică
c. Profil cu fantă dublă d. Profil cu placă perforată

O influență notabilă a gradului de porozitate și a lungimii zonei poroase a fost raportată în literatura de specialitate pentru a influența așa-numita structură de „tip λ ” a undelor de șoc. O creștere a gradului de porozitate conduce și la o creștere a pierderilor vâscoase. Forțele de frecare în zona de control cu placă perforată este de cel puțin două ori mai mare decât forțele

de frecare ale unui perete neted. Astfel, reducerea pierderilor de presiune totală prin transformarea unde de șoc normale în oblice poate fi anulată sau chiar depășită de pierderile vâscoase suplimentare în cazul în care geometria zonei perforate nu este implementată în mod optim [24]. Pierderile vâscoase crescute datorate rugozității suplimentare introduse de orificiile plăcii perforate și de fenomenul de injecție limitează considerabil efectul pozitiv al strategiei de control pasiv cu placă perforată asupra reducerii globale a rezistenței la înaintare. Cu toate acestea, acest concept de control pasiv ar putea fi în continuare de interes în aplicații cum ar fi dispozitivele de admisie supersonice sau componentele mașinilor cu paletе, unde evitarea desprinderii curgerii indusă de unde de șoc este obiectivul principal.

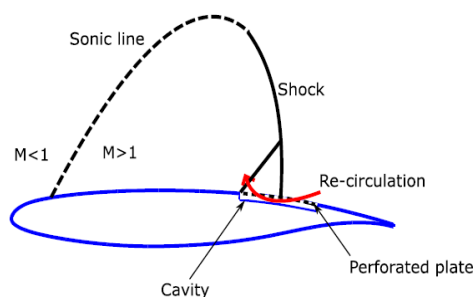


Fig. 1-6 Metodă de control pasiv al undei de șoc - schiță [17]

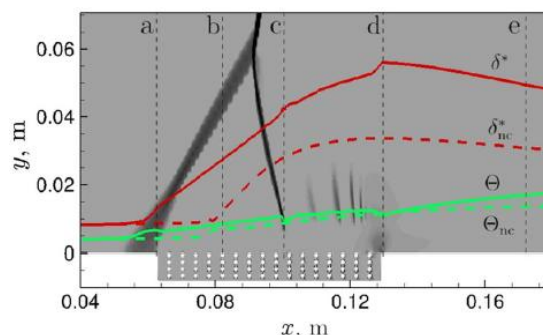
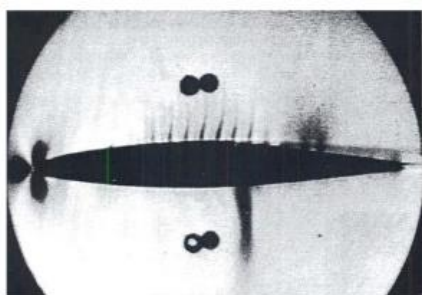
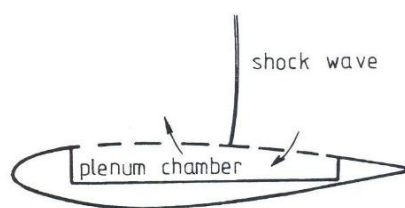


Fig. 1-7 Grosimea stratului limită [17]
(verde – referință, roșu – control pasiv cu placă perforată)

Experimental, prin intermediul vizualizării Schlieren, Savu et. al. [25] au demonstrat că o aripă perforată ar putea reduce intensitatea undei de șoc, ceea ce conduce în ansamblu la reducerea pierderilor totale de presiune și la reducerea nivelului de zgomot. Acest efect a fost obținut prin utilizarea unei cavități similare cu cea schițată în Fig. 1-8 în care se dezvoltă o zonă de recirculare în interiorul cavității. Rezultatele numerice și experimentale (Fig. 1-9) pentru o regiune de control perforată plasată pe pereții unui ajutoraj sunt prezentate de Szulc [26]. Atât simulările numerice, cât și vizualizarea Schlieren din experimente arată capacitatea materialului perforat de a reduce intensitatea undei de șoc prin trecerea la o structură de șoc de tip λ .



a.



b.

Fig. 1-8 Metodă de control pasiv al undei de șoc [25]
a. Imagine Schlieren $M = 0,785$ b. Profil cu control pasiv – placă perforată

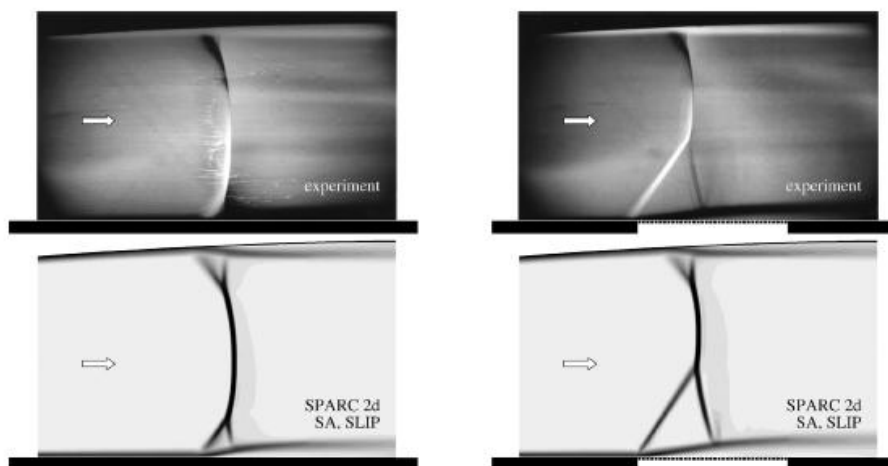


Fig. 1-9 Comparație numeric vs experimental pentru curgerea într-un ajutoraj (perete fără control vs perete cu placă perforată) [26]

1.3 Obiectivele tezei

Obiectivul principal al tezei este de a dezvolta o configurație nouă de difuzor paletat pentru compresoarele centrifugale ale microturbomotoarelor, caracterizată prin prezența unor zone de control pasiv cu placă perforată care permit recircularea și injecția de fluid în curgerea principală cu scopul de a atenua fenomenele induse de undele de șoc. Prin reducerea intensității undelor de șoc la regimuri de operare la debite mari, în apropierea blocajului, metoda de control pasiv va extinde domeniul de funcționare al difuzorului cu palete. Spre deosebire de lucrările științifice din literatură unde aplicarea plăcilor perforate se limitează la aerodinamica externă a profilelor izolate sau curgeri interne (de exemplu ajutoraje, dispozitive de admisie), lucrarea de față se concentrează pe comportamentul plăcilor perforate în configurație de profile dispuse în rețea și pe modul în care acestea modifică structurile undelor de șoc. Acest lucru conferă abordarea nouă și autentică a acestei cercetări, deoarece extinde implementările plăcilor perforate la configurații de tip rețea. Implementarea cu succes a noii configurații de palete propuse, urmată de creșterea ulterioară a nivelului de maturitate tehnologică, ar putea conduce la implementarea pe scară largă a metodei de control cu plăci perforate în microturbomotoare, cu beneficii tehnice și economice pentru utilizatorul final.

În vederea atingerii obiectivului principal (O), teza își propune să îndeplinească o serie de obiective specifice (SO) care servesc drept repere în progresul tehnologic general:

- Validarea numerică a conceptului privind capacitatea plăcilor perforate montate pe difuzoarele paletate ale microturbomotoarelor de a modifica structura undelor de șoc (SO1)
- Validarea experimentală a conceptului privind capacitatea plăcilor perforate de a modifica structura undelor de șoc în mediu relevant de tip rețea (SO2)
- Proiectarea și fabricarea unei rețele liniare reprezentativă pentru configurațiile difuzoarelor cu palete ale microturbomotoarelor (SO3)
- Proiectarea și fabricarea unor palete liniarizate de difuzor cu zone de control utilizând plăci perforate (SO4)

- Validarea experimentală a capacității plăcilor perforate de a modifica structura undelor de șoc și de a extinde domeniul de funcționare într-o rețea liniară de difuzor paletat specifică microturbomotoarelor (**SO5**)

Procedura de lucru din această lucrare este prezentată în Fig. 1-10. Activitățile sunt împărțite în trei pachete de lucru (WP). Activitățile din WP1 reprezintă punctul de plecare, evaluat la TRL 2 (nivel de maturitate tehnologică), deoarece demonstrează fezabilitatea și beneficiile potențiale ale strategiei de control pasiv cu plăci perforate implementate în interiorul difuzoarelor cu palete pentru compresoare centrifugale miniaturizate pentru microturbine cu gaz (**SO1**). Pentru a crește TRL la 4, două pachete de lucru experimentale sunt derulate în paralel, cu feedback valoros de la WP2 la WP3 (marcat cu săgeata violet) în ceea ce privește placa perforată cu cavitatea de sub parametrii geometrici.

Principalul obiectiv al WP2 este transferul și validarea conceptului de control pasiv al plăcii perforate de la operarea cu o singură aripă la mediul de lucru în cascadă (**SO2**). Rezultatele secundare ale WP2 includ, de asemenea, studiul tehnicilor de fabricare a plăcilor perforate și utilizarea adecvată a diagnosticului optic Schlieren pentru a investiga schimbarea structurii șocului dictată de implementarea plăcilor perforate cu cavități inferioare.

The workflow of the current thesis is presented in Fig. 1-10. The activities are divided into three work packages (WP). The activities in WP1 are the starting point, evaluated at TRL 2, as they prove the feasibility and potential benefits of the perforated plate passive control strategy implemented inside vaned diffusers for miniaturized centrifugal compressors for microgas turbines (**SO1**). To increase the TRL to 4, two experimental work packages are run in parallel, with valuable feedback from WP2 to WP3 (marked with the purple arrow) regarding the perforated plate with cavity underneath geometrical parameters.

The main goal of WP2 is to transfer and validate the perforated plate passive control concept from single airfoil operation towards the cascade working environment (**SO2**). Side results of WP2 also include the study of perforated plate manufacturing techniques and the proper use of Schlieren optical diagnosis to investigate the change in shock structure dictated by the implementation of perforated plates with cavities underneath.

To achieve the main goal of WP3, and so the main objective of the current thesis, a high-speed vaned diffuser linear cascade is designed, manufactured and commissioned (**SO3**), closely replicating the vaned diffuser geometry developed in WP1. Both baseline vanes, with no control applied, and passively controlled vanes using the perforated plate with cavity underneath concept, are additively manufactured (**SO4**) with emphasis on the aerodynamic surface and control region quality. An extensive experimental campaign is performed at the end of WP3 to thoroughly document the contribution of perforated plates to reduce the shock induced losses and to increase the operating range of a vaned diffuser (**SO5**).

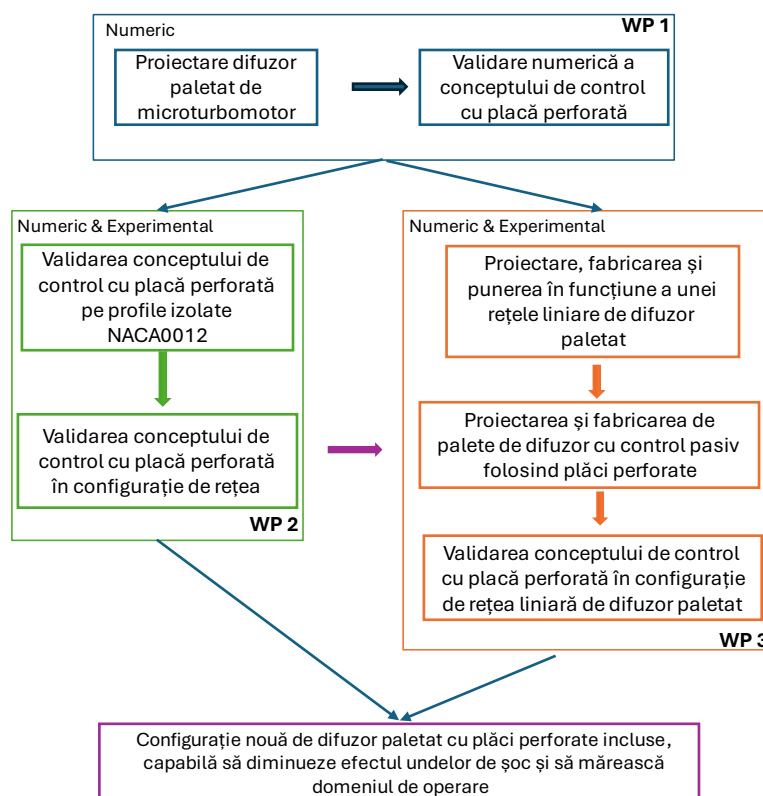


Fig. 1-10 Schema de lucru

1.4 Metodologie

Metodologia aplicată pentru atingerea obiectivelor specifice anterior menționate implică metode analitice, numerice și experimentale, care sunt utilizate fie independent, fie complementar, cu validarea rezultatelor între acestea. Metodologia de cercetare aplicată în lucrare de față include:

- Studiu de literatură
 - cu ajutorul motoarelor de căutare Google Scholar sau Web of Science, se va efectua o analiză a publicațiilor științifice relevante pentru tematica tezei de doctorat. Analiza va viza publicațiile cu factor de impact ridicat din bazele de date Web of Science, Scopus, IEEE sau ScienceDirect. Filtre pentru anul publicării vor fi utilizate cu scopul analizării de publicații în ordine invers cronologică publicării.
 - pe de o parte, studiul de literatură de specialitate se va axa pe microturbomotoare și compresoarele centrifugale ale acestora pentru a înțelege limitările de proiectare și căile posibile de îmbunătățire a eficienței sau a diagramelor de funcționare; pe de altă parte, analiza literaturii de specialitate va aborda metoda de control pasiv cu plăci perforate, cu accent pe rezultatele aplicațiilor anterioare și pe tehnicile de

fabricație, cu scopul de a găsi posibilități de dezvoltare și perspective de a le utiliza în configurații de rețea tipice pentru difuzoarele cu palete

- prin valorificarea studiilor numerice și experimentale disponibile în literatura de specialitate, împreună cu constatările, limitările și perspectivele de lucru viitoare ale autorilor, lucrarea de față va aborda provocările specifice legate de punerea în aplicare a metodei de control pasiv cu plăci perforate în interiorul difuzoarelor cu palete pentru turbomotoare
- Metode experimentale
 - vor fi studiate mai multe tehnici de fabricație a suprafețelor aerodinamice, cu plăci perforate, iar metodologiile de fabricare vor fi îmbunătățite iterativ pentru o soluție optimă între cost, timp și calitatea suprafeței
 - suflerii aerodinamice transonic-supersonice și rețele liniare transonic-supersonice vor fi utilizate ca medii principale de testare împreună cu tehnica de vizualizare Schlieren și traductoare de presiune
 - pentru a reduce erorile de măsurare, calibrarea senzorilor va fi efectuată, cu validare numerică din simulările CFD
 - intervalele de încredere experimentale vor fi calculate și raportate pentru a asigura consecvența și repetabilitatea pe parcursul campaniilor experimentale
- Modelare numerică
 - strategiile avansate de generare a grilei pentru plăcile perforate, împreună cu abordările de modelare, vor fi dezvoltate în pachete software comerciale, utilizând scheme numerice adecvate pentru a surprinde fenomenele asociate curgerilor la viteze mari
 - condiții la limită bazate pe măsurătorile experimentale vor fi utilizate pentru a reproduce exact mediile și condițiile de testare
- Procesarea datelor
 - vor fi dezvoltate scripturi interne pentru procesarea datelor experimentale și analiza lor statistică (în principal va fi utilizată distribuția T-student pentru un număr limitat de eșantioane experimentale)
 - datele simulărilor numerice vor fi prelucrate cu pachete software comerciale, nu numai pentru a valida rezultatele experimentale, ci și pentru a extinde analiza domeniilor de curgere

Pentru fiecare obiectiv specific, se propune următoarea metodologie de cercetare:

- **SO1** –Literatura științifică disponibilă privind abacele de proiectare și corelațiile statistice pentru difuzoarele paletate va fi utilizată pentru proiectarea unui difuzor de referință. O analiză a literaturii de specialitate privind metoda de control pasiv cu plăci perforate va furniza principalii parametri geometrici ai regiunii de control. Impactul plăcilor perforate în interiorul difuzoarelor cu palete tipice microturbomotoarelor va fi studiat numeric utilizând scheme capable să surprindă undele de șoc. Vor fi analizate mai multe metode de modelare numerică a plăcilor perforate.

- **SO2** – Ferestrele de access optic ale unei suflerii aerodinamice de mare viteză vor fi re-proiectate și fabricate pentru a permite montarea de profile aerodinamice în configurație de rețea. Vor fi studiate mai multe tehnici de fabricație atât pentru profilele de bază (fără control aplicat), cât și pentru profilele cu plăci perforate incluse. Un sistem Schlieren de tip Z, cu o cameră de mare viteză, va fi utilizat pentru vizualizarea curgerii cu accent pe o setare optimă a ratei de achiziție, rezoluției și timpului de expunere pentru maximizarea calității imaginilor. Presiunea statică pe pereții inferiori ai tunelului aerodinamic va fi înregistrată prin intermediul unui scanivalve. Pentru campania experimentală finală, regimul de funcționare al tunelului aerodinamic va fi reglat astfel încât, în configurația de bază, să fie generate unde de șoc normale puternice la mijlocul coardei profilelor în interiorul canalelor de curgere. Toate celelalte configurații în rețea vor fi testate la același regim. Vor fi efectuate simulări numerice, iar datele vor fi comparate cu rezultatele experimentale.
- **SO3** – Pornind de la configurația de referință a difuzorului cu palete proiectat în cadrul SO1, se va genera o versiune liniarizată a difuzorului cu palete și se va integra într-o instalație de testare de tip rețea liniară. Se vor efectua etape de proiectare iterativă bazate pe rezultatele CFD pentru a obține caracteristicile de curgere dorite în rețea. Întreaga instalație va fi proiectată luând în considerare măsurătorile experimentale care urmează să fie efectuate.
- **SO4** – Vor fi studiate mai multe tehnici și metodologii de fabricație (care utilizează superaliaje specifice turbomotoarelor) pentru producția de palete liniarizate de difuzor cu sau fără control pasiv cu plăci perforate. Capacitatea de a produce suprafețele aerodinamice și plăci perforate de înaltă calitate, fabricarea rapidă și costurile reduse sunt criteriile care vor fi considerate la alegerea finală a procesului de fabricație.
- **SO5** – Se vor efectua teste de punere în funcțiune pentru a verifica dacă întreaga instalație este etanșă și dacă toată instrumentarea asigură o achiziție cu frecvență ridicată a datelor. În special, calitatea imaginilor Schlieren va fi verificată, pentru ca gradientii de densitate asociați undelor de șoc să fie vizibili. Campania experimentală finală se va desfășura la mai multe regimuri, utilizând palete de bază și palete cu plăci perforate. Rezultatele experimentale vor fi comparate cu cele numerice.

CAPITOLUL 2 REZUMATUL LUCRĂRII

Scopul studiului din Capitolul 2 este proiectarea unui difuzor paletat pentru un rotor centrifugal deja existent, proprietate a Institutului Național de Cercetare Dezvoltare Turbomotoare COMOTI. Aplicația directă a acestui compressor centrifugal este un motor turboreactor simplu flux de 40 daN, având cerințe stricte de proiectare legate de eficiență și dimensiune. Geometria difuzorului dezvoltată în Capitolul 2 servește drept configurație de bază utilizată pentru a studia implementarea plăcilor perforate ca metode pasive de control al curgerii în medii de funcționare de tip rețea, tipice pentru mașinile cu palete ale turbomotoarelor.

Conținutul din Capitolul 2 prezintă o metodologie pentru proiectarea întregului difuzor. Proiectarea preliminară se bazează pe analize termodinamice la raza medie, $0D/1D$, și pe corelații statistice precise, cu coeficienți de determinare R^2 ridicați, dezvoltate în mod original în Anexele C și D din lucrarea de față. Toate corelațiile statistice sunt generate folosind bazele de date ale microturbomotoarelor și ale compresoarelor raportate în Anexele A și B. Corelația cu funcție putere din Fig. 2-1 este utilizată pentru a estima raza de 75 mm a carcasei difuzorului cu palete pentru o forță de propulsie de 40 daN. Pentru difuzorul nepaletat, se aplică criteriile de proiectare legate de stabilitatea acestuia, pentru a se asigura că unghiul de ieșire și numărul Mach rămân în limite de funcționare stabile. Pentru difuzorul cu paletat, proiectarea paletelor s-a bazat pe abace de proiectare și corelații statistice, luând în considerare factori precum soliditatea, modificarea unghiului curgerii intrare-ieșire, factorul de difuzie și numărul Reynolds. Ulterior etapei de anteproiectare, simulări CFD 3D în regim staționar ale întregii trepte centrifugale sunt efectuate în Ansys CFX cu grile structurate generate utilizând Ansys TurboGrid.

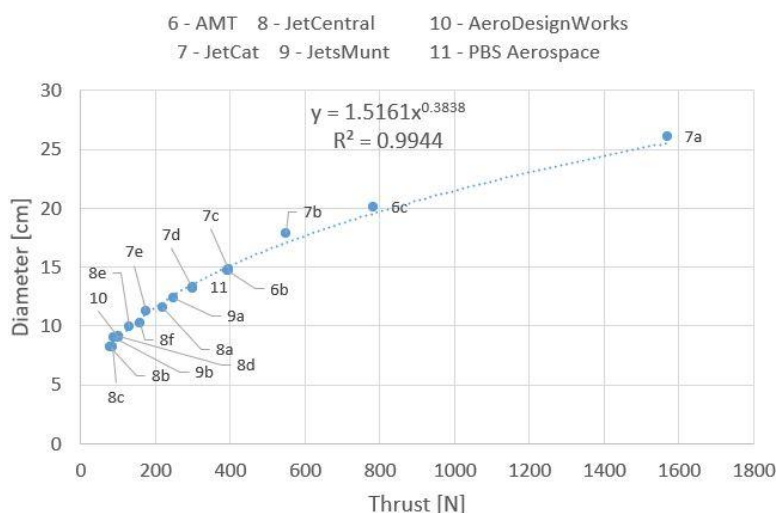


Fig. 2-1 Corelație statistică de anteproiectare - Diametru vs Forța de propulsie
(sursa: Capitol 2 [27])

Cu ajutorul iterațiilor de proiectare și al utilizării modelării CFD, metodologia de proiectare din Capitolul 2 a condus la o treaptă centrifugală cu un randament izentropic total ridicat (84,1%), un raport de comprimare total ridicat (4,78), un coeficient de difuzie de 0,59 și un unghi al curgerii la ieșire de $\sim 29^\circ$ și poate fi considerată drept o metodologie de proiectare a difuzoarelor cu palete similare.

Pentru demonstrarea numerică a conceptului privind capacitatea plăcilor perforate instalate pe difuzoarele paletate ale microturbomotoarelor de a modifica structura undelor de

șoc, în Capitolul 3 sunt utilizate trei difuzoare diferite, derivate din difuzorul cu palete de bază obținut în Capitolul 2. Rotorul utilizat în Capitolul 2, proprietate a Institutului Național de Cercetare Dezvoltare Turbomotoare COMOTI, a rămas nemodificat. Cele trei geometrii ale difuzoarelor paletate din Capitolul 3 includ o versiune cu soliditate redusă și două omologe cu soliditate ridicată. Geometria finală de difuzor, utilizată pentru toate studiile experimentale și numerice ulterioare din prezenta teză, este prezentată în Fig. 2-2 și include 17 canale de curgere cu palete principale și secundare. Înălțimea canalului difuzorului este de 4 mm.

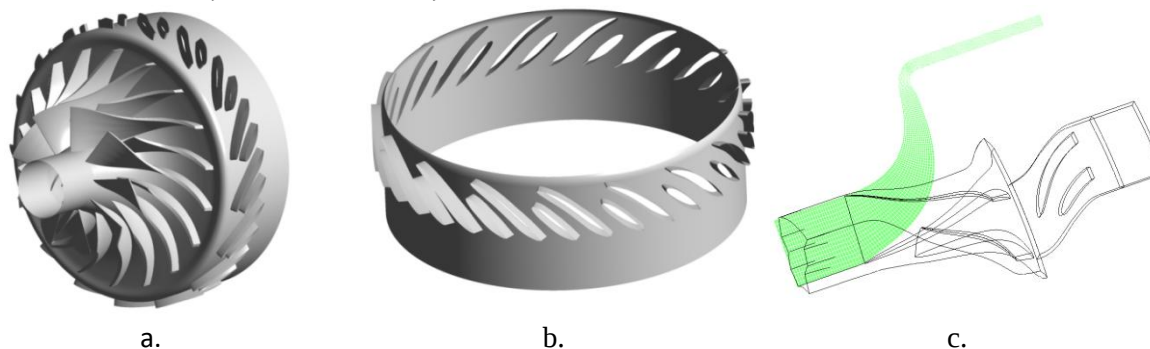


Fig. 2-2 Geometria de referință a difuzorului paletat de microturbomotor

a. treaptă integrală cu rotor inclus b. difuzor paletat c. canalul de curgere (sursa: Capitol 6 [31])

Pentru modelarea numerică a plăcilor perforate integrate în difuzorul cu palete din Capitolul 3, cavitatea de control este generată în ICFM CFD ca extrudare directă a elementelor de grilă structurate din TurboGrid. Orificiile plăcii perforate sunt ulterior definite ca suprafețe permeabile care leagă domeniul fluid deasupra și dedesubtul cavității de control. În funcție de pozițiile de amorsare a undelor de șoc în configurația de bază, fără control, atât paletele principale, cât și cele secundare includ două regiuni de control cu plăci perforate, cu orificii de 0,5 mm și cavități de 0,5 mm adâncime. Simulările numerice pentru întreaga treaptă centrifugală sunt realizate la turația de 68 000 rpm, cu condiții la limită de presiune totală atmosferică la intrare și debit masic sau presiune statică la ieșire. Pentru o presiune statică de ieșire de 2,2 bara, care corespunde unui regim de debite mari, se înregistrează o creștere a performanței pentru cazul cu control pasiv, ceea ce conduce la o creștere de 1% a randamentului isentropic total și la o reducere de 0,03 bar a pierderii de presiune totală. Creșterea performanței este atribuită capacității plăcilor perforate de a reduce intensitatea undelor de șoc, așa cum arată contururile gradientului de densitate la 50% înălțimea canalului în Fig. 2-3.

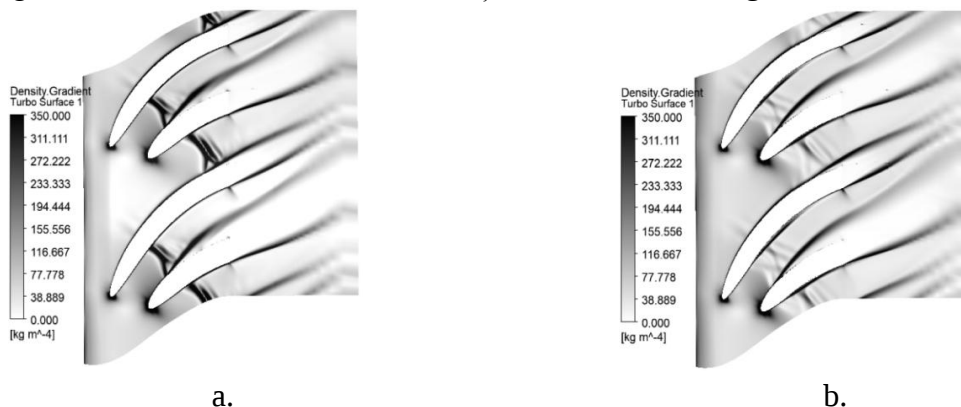


Fig. 2-3 Gradientul densității – 50% din înălțimea canalului
a. referință b. control pasiv (sursa: Capitol 3 [28])

Studiul din Capitolul 4 analizează utilizarea plăcilor perforate ca metodă pasivă de control al curgerii pentru îmbunătățirea performanței aerodinamice a profilelor aerodinamice NACA0012 și servește drept validare a metodologiei de cercetare înainte de a investiga funcționarea plăcilor perforate în medii de rețea, tipice pentru difuzoarele cu palete ale microturbomotoarelor. Capitolul 4 se concentrează în principal pe atenuarea efectelor negative ale interacțiunilor dintre unda de șoc și stratul limită (SBLI), care apar în curgerile cu viteze mari și conduc la gradienti adversi de presiune și rezistență sporită. În plus, studiul investighează modul în care plăcile perforate modifică structura undelor de șoc. Prin reducerea intensității undelor de șoc și distribuirea gradientului de presiune pe o suprafață mai mare, studiul urmărește să evalueze îmbunătățirile în ceea ce privește pierderea de presiune totală.

Metodele experimentale includ un tunel aerodinamic de mare viteză, cu aspirație atmosferică de tip „Eiffel”, capabil să genereze curgeri de până la Mach 1,8. Componentele principale ale infrastructurii experimentale includ un sistem Schlieren tip Z pentru vizualizarea structurilor undelor de șoc, un sistem de măsurare a presiunii statice care utilizează 18 sonde de presiune de-a lungul peretelui inferior al tunelului aerodinamic și o serie de profile aerodinamice cu plăci perforate având orificii de dimensiuni cuprinse între 0,5 mm și 1,2 mm. Testele sunt efectuate cu profilele aerodinamice montate la un unghi de incidență nul. Fiecare profil aerodinamic are o suprafață de bază, fără control, în timp ce cealaltă este echipată cu o placă perforată și o cavitate pentru controlul pasiv. Pentru validarea și extinderea datelor experimentale, se efectuează simulări numerice 3D în regim staționar utilizând Ansys FLUENT. Simulările utilizează un solver bazat pe densitate și modelul de turbulență $k-\omega$ SST. O grilă nestructurată de 35 de milioane de elemente cu îndesiri locale în jurul profilului aerodinamic și a zonelor perforate asigură o rezoluție precisă, în special în ceea ce privește undele de șoc și interacțiunile cu stratul limită. Condițiile la limită pentru simulări sunt derivate din măsurătorile experimentale din tunelul aerodinamic (presiunea totală la intrare și presiunea statică la ieșire).

Pentru rezultate experimentale relevante, studiul din Capitolul 4 explorează mai multe metode de fabricație pentru profile aerodinamice NACA0012 cu plăci perforate:

- Fabricarea aditivă folosind PLA (2 componente – profil + placă perforate): costuri reduse și suprafețe cu o calitate acceptabilă pentru profilul aerodinamic; metoda se confruntă cu probleme legate precizia asamblării între suprafața profilului și placa perforate
- Fabricarea aditivă folosind Inconel: această metodă necesită o postprocesare a suprafeței aerodinamice din cauza rugozității rezultate din printare, ceea ce a condus la abandonarea temporară a acestei metode de fabricație.
- Fabricarea aditivă folosind PLA (structură care include și placa perforate): această tehnică oferă rezultate de înaltă calitate și a fost aleasă pentru a fabrica modelele experimentale finale cu dimensiuni variabile ale orificiilor plăcii perforate în intervalul 0,5-1,2 mm (Fig. 2-4).
- Tăierea cu jet de apă și inserție de aluminiu pentru placa perforată (Fig. 2-5): această metodă conferă o fabricare precisă a orificiilor de dimensiuni reduse, dar compromite curbura profilului în zona de asamblare.

Profilurile aerodinamice fabricate folosind tăierea cu jet de apă și fabricarea aditivă PLA monobloc sunt selectate în cele din urmă pentru testele din tunelul aerodinamic datorită calității și preciziei superioare a suprafeței lor.

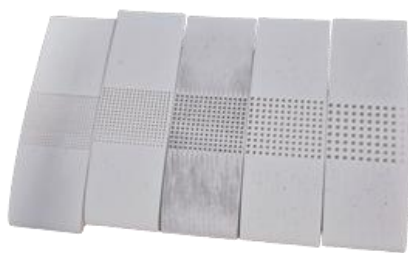
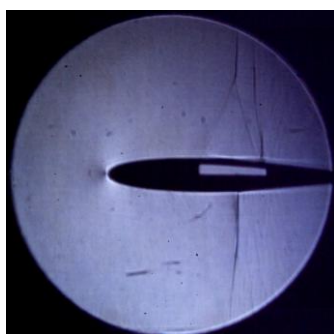


Fig. 2-4 Profile fabricate aditiv din PLA - multiple diametre ale găurilor plăcii perforate (0.5 mm-1.2 mm) (sursa: Capitol 4 [29])

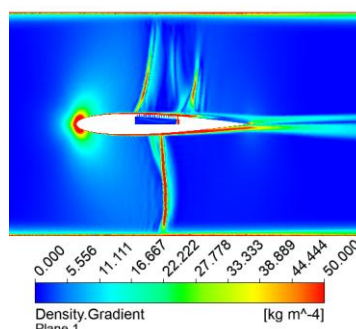


Fig. 2-5 Profil fabricat prin tăiere cu jet de apă ce conține o placă perforată de Aluminu (orificii de 0.5 mm) (sursa: Capitol 4 [29])

În baza vizualizării Schlieren, validată de simulările numerice, plăcile perforate au transformat undele de șoc normale, de intensitate mare, în structuri de unde de șoc de tip λ , așa cum se arată în Fig. 2-6. Astfel se redistribuie gradientul total de presiune, reducând intensitatea unei singure unde. Pe măsură ce dimensiunile orificiilor plăcilor perforate cresc, structurile de tip λ evoluează într-o serie de unde de compresie oblice mai slabe. În general, introducerea plăcilor perforate conduce la presiuni statice ușor mai mari în regiunea de control comparativ cu cazul de bază, fără control. Acest lucru este atribuit plăcilor perforate care limitează accelerarea locală a curgerii. Datele experimentale de presiunea statică demonstrează că creșterea dimensiunii orificiului, conduce la o creștere a presiunii statice minime în regiunea de control.



a.



b.

Fig. 2-6 Comparație între rezultatele experimentale și cele numerice (extrados – placă perforată cu orificii de 0.5 mm, intrados – nicio metodă de control aplicată)
a. Schlieren experimental b. Schlieren numeric (sursa: Capitol 4 [29])

Rezultatele numerice pentru cazul de referință fără control aplicat și cazul de 0,5 mm cu placă perforată arată că strategia de control a oferit o reducere cu 0,2% a pierderii de presiune totală în comparație cu cazul de referință. Această îmbunătățire este obținută ca urmare a bilanțului favorabil dintre reducerea pierderilor de presiune totală prin undele de șoc și creșterea pierderilor vâscoase cauzate de rugozitatea indusă de placă. Simulările numerice au validat rezultatele experimentale, demonstrând o concordanță calitativă în structura undelor de șoc (Fig. 2-6) și distribuția presiunii statice (Fig. 2-7).

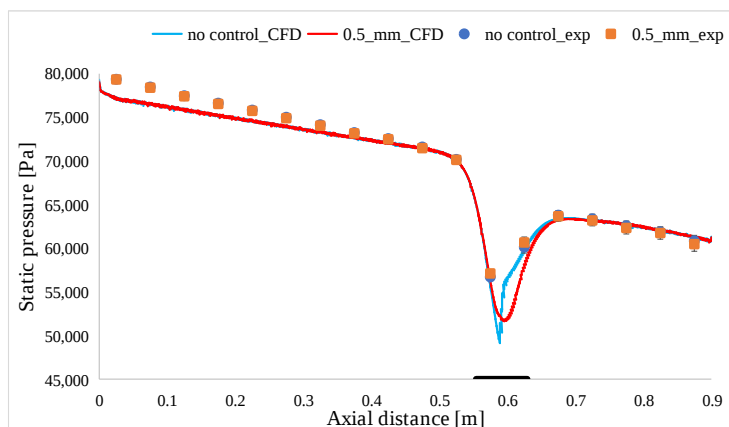


Fig. 2-7 Distribuția presiunii statice pe peretele inferior al tunelului aerodinamic (sursa: Capitol 4 [29])

Studiul din Capitolul 4 confirmă că plăcile perforate sunt o strategie viabilă de control pasiv pentru îmbunătățirea performanței aerodinamice în curgeri transonic-supersonice. Reducerea pierderilor de presiune totală induse de undele de șoc poate fi superioară creșterii pierderilor vâscoase cauzate de rugozitatea suplimentară a plăcilor perforate. Cercetarea subliniază importanța optimizării dimensiunilor orificiilor și a tehnicilor de fabricație pentru a maximiza creșterile de performanță. În plus, observațiile făcute reprezintă un punct de plecare pentru studii ulterioare în domeniul aeronautic, în special în medii de lucru de tip rețea, unde controlul interacțiunilor dintre undele de șoc și stratul limită este esențială pentru randamente ridicate.

Studiul din Capitolul 5 cercetează aplicarea plăcilor perforate ca strategie de control pasiv pentru modificarea structurilor undelor de șoc într-o configurație de rețea de profile NACA0012. Acest studiu extinde rezultatele obținute în Capitolul 4 în cazul profilele izolate. Scopul principal este de a evalua comportamentul plăcilor perforate cu privir la modificarea structurii undelor de șoc în mediul de lucru tip rețea, extrem de relevant pentru mașinile cu palete.

În Capitolul 5 sunt analizate experimental șase configurații diferite de profile aerodinamice, incluzând o configurație de bază fără control și cinci configurații cu diferite diametre ale perforațiilor plăcii perforate în intervalul 0,5 mm-1,2 mm (Fig. 2-8). Toate profilele aerodinamice au fost fabricate aditiv folosind PLA. Plăcile perforate au fost montate atât pe intradosul, cât și pe extradosul profilelor aerodinamice (Fig. 2-9).

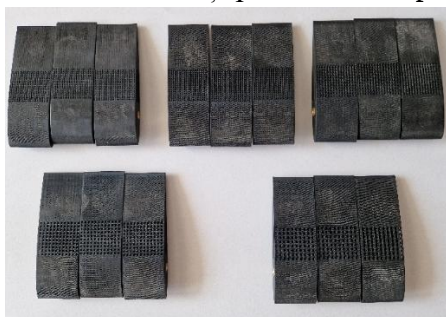


Fig. 2-8 Profile fabricate aditiv - multiple dimensiuni ale orificiilor plăcii perforate (0.5 mm, 0.65 mm, 0.8 mm, 1 mm, 1.2 mm) (sursa: Capitol 5 [30])



Fig. 2-9 Profil fabricat aditiv din PLA cu orificii de 0.5 mm pe placa perforată – detaliu (sursa: Capitol 5 [30])

Experimentele sunt efectuate în același tunel aerodinamic deschis de tip „Eiffel” utilizat în Capitolul 4, ce poate atinge viteze de până la Mach 1,8. Infrastructura include vizualizare Schlieren pentru identificarea undelor de șoc și prize de presiune statică de-a lungul peretelui inferior al tunelului. Configurația de rețea constă în trei profile aerodinamice la incidență nulă. Pentru a monta configurația cu trei profile, ferestrele de acces optic ale tunelului au fost reproiectate și fabricate.

Pentru a extinde rezultatele experimentale pentru cazul de referință și pentru cazul plăcii perforate de 0,5 mm, au fost efectuate simulări numerice RANS 3D în regim staționar în Fluent utilizând modelul de turbulență $k-\omega$ SST. O grilă de calcul nestructurată de 35 de milioane de celule a fost generată în Ansys Meshing folosind îndesiri locale în regiunea rețelei și în regiunile perforate.

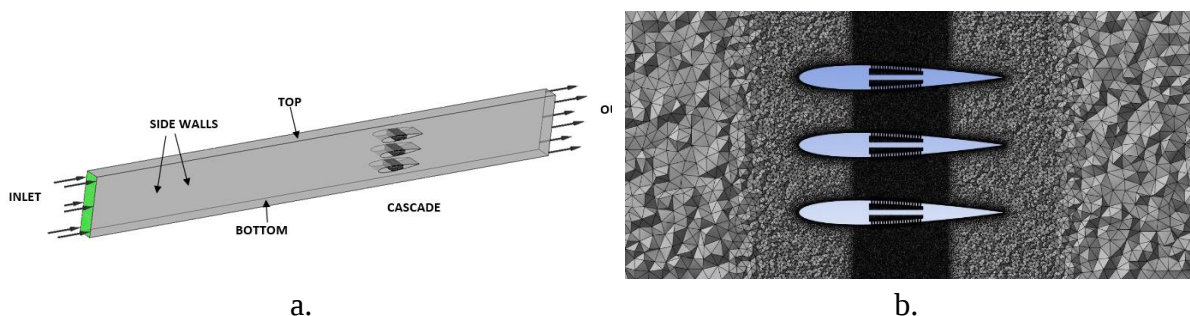


Fig. 2-10 Simulare numerică
a. domeniul de calcul b. grila de discretizare în zona de control pasiv (sursa: Capitol 5 [30])

În cazul de bază, fără control, au fost observate unde de șoc normale puternice, atât numeric (Fig. 2-13 a), cât și experimental (Fig. 2-11 a sau Fig. 2-13 c), prin tehnica Schlieren. Introducerea plăcilor perforate a schimbat configurația unei unde de șoc normale într-o structură oblică de tip „X”, mai slabă ca intensitate (Fig. 2-13 b și Fig. 2-11 b-f). Numeric, au fost obținute distribuții îmbunătățite a presiunii statice în zona de accelerare-decelerare locală (Fig. 2-12) cu gradienti mai mici în configurațiile cu control pasiv, care au confirmat reducerea pierderilor de presiune totală induse de undele de șoc. Stratul limită a suferit o îngroșare în regiunile cu plăci perforate din cauza recirculării și a injecțiilor de fluid induse de cavități. În ciuda reducerii intensității undelor de șoc, rezultatele CFD mediate masiv au arătat o creștere de aproape 2% a pierderilor de presiune totală pentru cazul cu control pasiv de 0,5 mm comparativ cu cazul de referință fără control.

În concluzie, studiul din Capitolul 5 confirmă că, utilizate în configurație de rețea, plăcile perforate pot modifica structura undelor de șoc în configurații de intensitate mai redusă, diminuând indirect pierderile de presiune totală. Cu toate acestea, eficacitatea lor depinde de bilanțul dintre rezistența de undă redusă și creșterea pierderilor vâscoase cauzate de mecanismul de control al plăcii perforate împreună cu rugozitatea suplimentară a orificiilor. Optimizarea parametrilor geometrice ai plăcilor perforate, precum dimensiunea și distribuția perforațiilor, poate îmbunătăți performanța acestora.

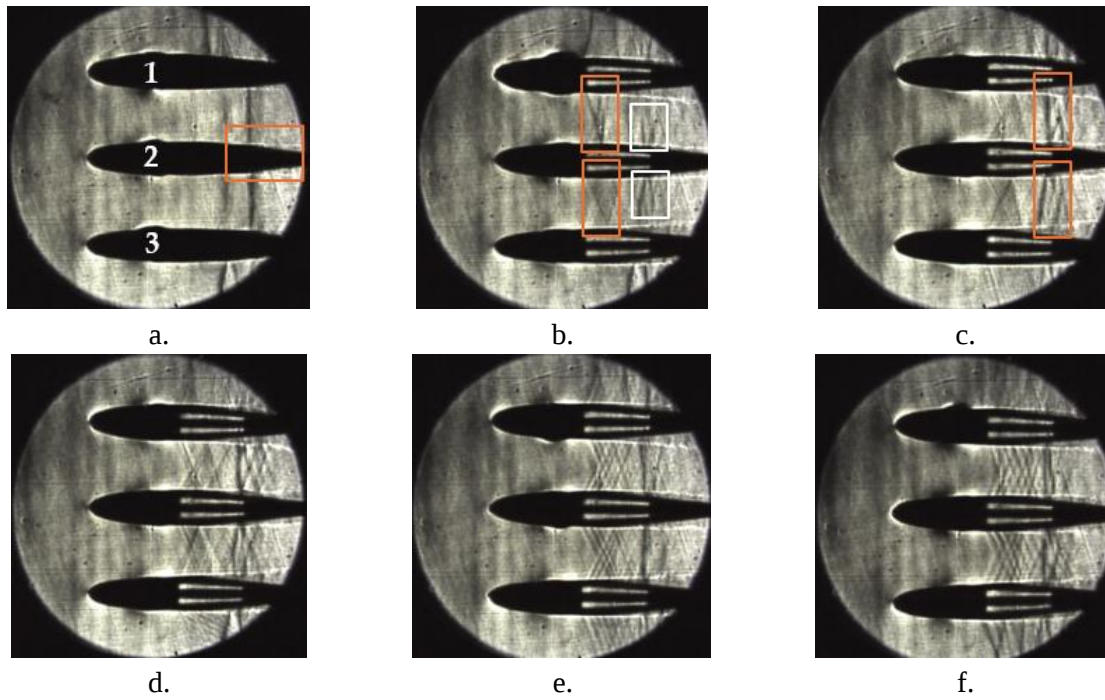


Fig. 2-11 Imagini Schlieren

a. referință (fără control) b. 0.5 mm c. 0.65 mm d. 0.8 mm e. 1 mm f. 1.2 mm (sursa: Capitol 5 [30])

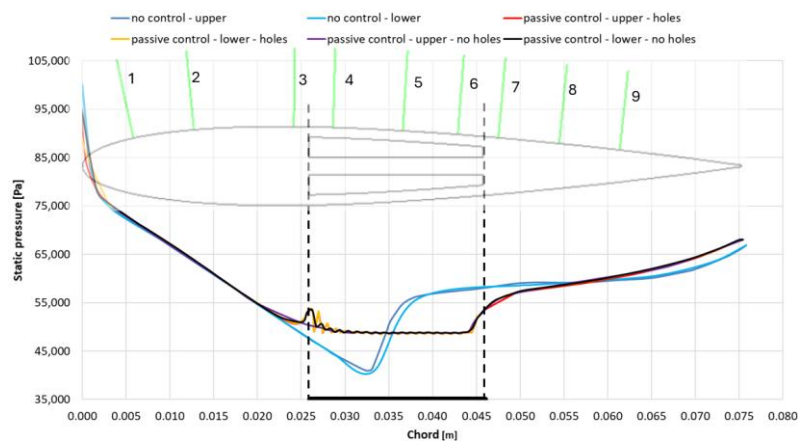


Fig. 2-12 Distribuția de presiune statică pe profilul 2
(referință vs control pasiv - orificii 0.5 mm)
(sursa: Capitol 5 [30])

Capitolul 6 prezintă proiectarea și simularea unei infrastructuri de testare de tip rețea liniară transonic-supersonică, destinată studierii structurii undelor de șoc într-o configurație liniarizată a difuzorului cu palete dezvoltat în Capitolul 2. Scopul principal este punerea în evidență a undelor de șoc în interiorul rețelei, deoarece acestea reprezintă o configurație de bază în care strategia de control pasiv cu plăci perforate poate fi aplicată, studiată și validată într-un mediu de lucru mai relevant pentru mașinile cu palete, ca a continuare a studiilor prezentate în Capitolul 5.

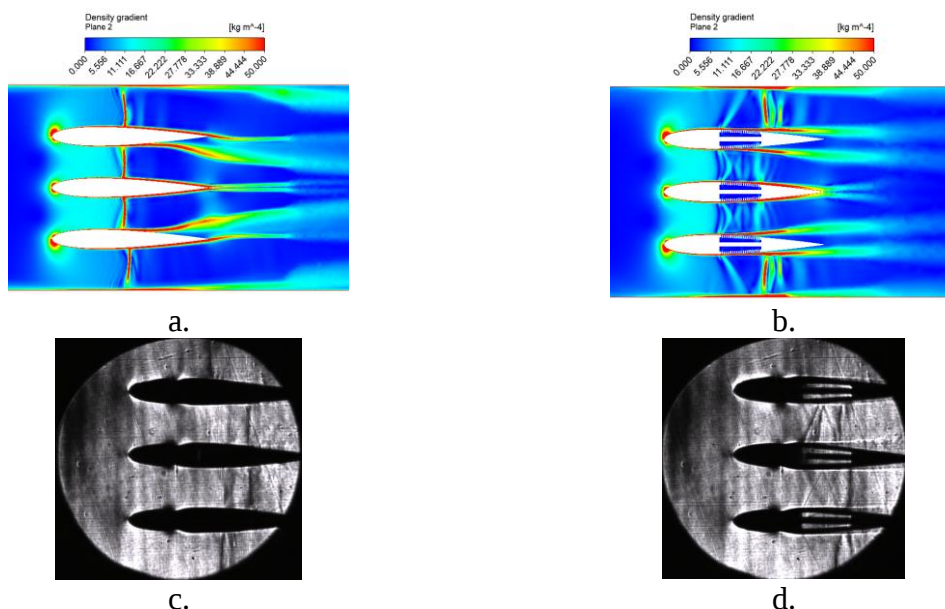


Fig. 2-13 Comparație calitativă între rezultatele numerice și experimentale
a. CFD fără control b. CFD cu control pasiv - orificii 0.5 mm
c. EXP fără control d. EXP cu control pasiv - orificii 0.5 mm (sursa: Capitol 5 [30])

În procedura de proiectare, obiectivul este de a minimiza resursele experimentale și de calcul prin valorificarea diferitelor regimuri de curgere în canalele de lucru, explorând astfel mai multe puncte de lucru ale difuzorului paletat simultan, într-un singur experiment sau simulare. Pentru definirea preliminară a rețelei liniare, geometria inelară a difuzorului cu palete de bază proiectat în Capitolul 2 (Fig. 2-4 a) a fost intersectată cu o suprafață cilindrică la mijlocul canalului și apoi desfășurată într-o reprezentare ‘blade to blade’ (Fig. 2-14 b). Zona paletată a fost apoi extinsă într-o configurație liniară completă de rețea (Fig. 2-15), impunând direcția curgerii la intrare și la ieșire pentru a asigura o incidență și o uniformitate corespunzătoare a curgerii, în conformitate cu condițiile inițiale de intrare ale difuzorului inelar original.

Studii numerice RANS au fost efectuate în Ansys CFX pentru a simula comportamentul curgerii și a valida prezența structurilor undelor de șoc. Au fost efectuate iterații de proiectare cu feedback de la rezultatele CFD pentru a îmbunătăți caracteristicile curgerii în rețeaua liniară, minimizând neuniformitățile din curgere la admisie, precum și efectele pereților laterali. Pentru a valida în continuare rezultatele numerice, a fost efectuat un studiu de convergență a grilei care monitorizează variația adimensională a presiunii totale intrare-ieșire. Au fost utilizate grile numerice variind de la grosiere (7 milioane de celule) la fine (36 de milioane de celule).

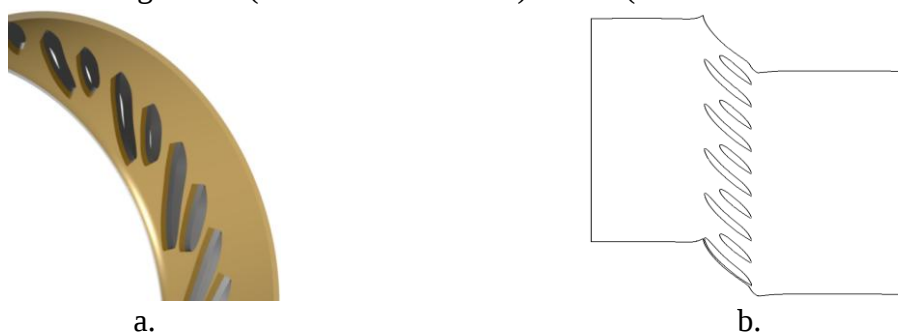


Fig. 2-14 Procedura de liniarizare a difuzorului paletat inelar
a. suprafață cilindrică la 50% din înălțimea canalului b. difuzor paletat liniarizat
(sursa: Capitol 6 [31])

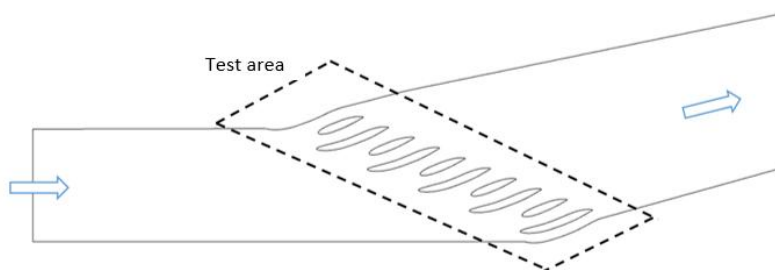


Fig. 2-15 Rețea liniară care înglobează difuzorul paletat liniarizat
(sursa: Capitol 6 [31])

Geometria finală a rețelei liniare de difuzor paletat din Capitolul 6 prezintă o diferență de 9% în ceea ce privește debitul masic între canalele extreme, ușor mai mare decât diferența de 5% în ceea ce privește debitul masic atunci când aceleași canale sunt simulate individual cu condiții la limită periodice. Aceste variații ale debitului masic pe canale pot fi reprezentative pentru diferite regimuri de funcționare la diferite linii de izoturație ale difuzorului cu palete. Implementarea plăcilor perforate în astfel de configurații va evalua impactul strategiei de control în mai multe puncte de funcționare, subliniind modul în care aceasta modifică structura undelor de șoc. Structura undelor de șoc identificată în această configurație de bază (Fig. 2-16), înainte de aplicarea controlului pasiv, variază de la unde de șoc tari, normale în interiorul canalelor de curgere principale și secundare, la unde de șoc tari, normale în zona bordului de atac al paletei principale, unde nu este prezentă mărginirea canalului de către un al doilea perete. Acest din urmă mediu de funcționare este tipic pentru un profil aerodinamic izolat, deoarece un singur perete al paletei definește canalul de curgere.

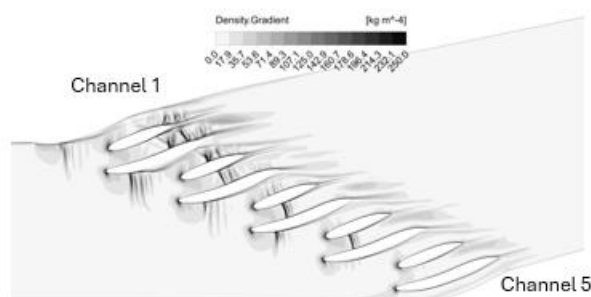


Fig. 2-16 Gradientul densității în regiunea rețelei de palete – referință (fără control pasiv)
(sursa: Capitol 6 [31])

Zonele de accelerare locală în apropierea bordului de atac și în regiunile de la mijlocul paletei secundare generează intensități variabile ale undelor de șoc de-a lungul canalelor de curgere. Primele două canale prezintă unde de șoc puternice, dar intensitatea scade progresiv de la primul la al cincilea canal. Distribuția coeficientului de presiune pe paletele principale și secundare evidențiază prezența și intensitatea undelor de șoc.

În concluzie, studiul din Capitolul 6 prezintă proiectarea și validarea numerică cu succes a unei rețele liniare capabile să exploreze o gamă largă de structuri de unde de șoc. Rețeaua este relevantă pentru funcționarea difuzoarelor cu palete ale compresoarelor centrifugale ale microturbomotoarelor la diferite puncte de pe diagrama de funcționare a acestora.

Rețeaua liniară de difuzor paletat proiectată în Capitolul 6 a fost fabricată prin frezare, cu excepția paletelor, care au fost fabricate separat. Întreaga metodologie de fabricație este descrisă în Capitolul 7. Componentele principale care definesc canalul de curgere al rețelei liniare sunt descrise în vederea explodată din Fig. 2-16. Canalul de curgere este definit de două plăci: cea

inferioară, unde este frezat canalul de curgere, și cea superioară, care închide canalul de curgere și elimină jocurile la vârf. În plus, două capace înșurubate pe plăcile menționate anterior asigură alinierea corectă a ferestrelor de acces optic din cuarț și a paletelor de difuzor. Un adaptor de admisie, fabricat aditiv prin PLA, face, de asemenea, parte din instalația de testare și asigură tranziția de la conducta de alimentare circulară, provenind de la un rezervor de aer comprimat, la o secțiune de admisie dreptunghiulară a rețelei liniare.

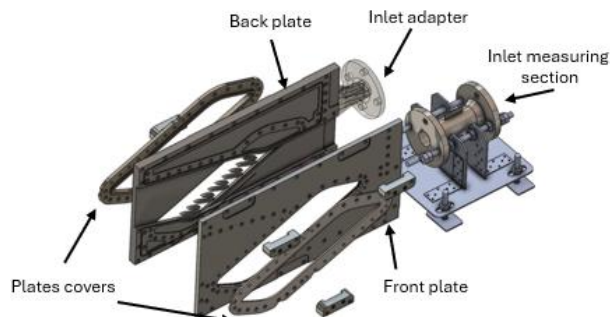


Fig. 2-17 Vedere descompusă a rețelei liniare
(sursa: Capitol 7 [32])

Dificultăți în procesul de fabricație au fost identificate la paletele liniarizate de difuzor, fie în cazul de bază, fără control aplicat, fie în versiunea cu control pasiv, cu mai multe regiuni perforate aplicate. Plăci perforate tip tablă de șah cu cavități de 2 mm au fost utilizate. Au fost efectuate mai multe iterații de fabricație înainte de a se ajunge la o soluție finală care să satisfacă calitatea dorită a suprafeței paletelor, pe de o parte, și calitatea orificiilor plăcilor perforate, pe de altă parte. Fabricare aditivă utilizând superaliajul Inconel 625, specific mașinilor cu palete, a folosit metoda de topire cu laser pe pat de pulbere (L-PBF), procesul de topire selectivă cu laser (SLM).

În prima iterație a procesului de fabricație (Fig. 2-18 a), au fost identificate mai multe probleme legate de grosimea pereților, fiind prea subțiri pentru a putea fi construiți cu laserul (în special la bordul de fugă al paletelor secundare). În plus, dimensiunea nominală de 0,5 mm a orificiilor plăcii perforate, împreună cu distanța dintre găuri, erau prea reduse pentru capacitățile și precizia de fabricație. Abaterea de la forma circulară a găurilor a fost prea mare, iar unele orificii nu au fost complet perforate, ceea ce a condus la o calitate generală slabă a plăcii perforate, care ar fi putut afecta funcționarea corectă a controlului pasiv în timpul experimentelor. Prin urmare, dimensiunea orificiilor a fost modificată la 0,75 mm din motive tehnologice, iar distanța dintre orificii a fost modificată în consecință la de 2,6 ori noul diametru nominal de 0,75 mm în sens longitudinal și la de 1,5 ori noul diametru în sens transversal. Pentru controlul final al rugozității, a fost aplicată tehnica sablării. Cu toate acestea, calitatea finală a suprafeței de curgere nu a fost satisfăcătoare și au fost propuse alte procese de frezare pentru iterațiile viitoare de proiectare. Acest lucru a presupus adăugarea de material la dimensiunile tuturor cotelor pentru controlul calității suprafeței prin prelucrare, precum și integrarea unei platforme la baza modelelor pentru a facilita prinderea CNC (Fig. 2-18 b). Pentru a rafina și mai mult procesul de fabricație din a doua iterație (Fig. 2-18 c), capetele platformei de bază ale modelului experimental au fost rotunjite pentru a diminua pierderile de material și pentru a proteja racleta mașinii de printare.

Procedura finală de fabricație a constat în fabricarea aditivă utilizând superaliajul Inconel 625, specific mașinilor cu palete, folosind metoda de topire cu laser pe pat de pulbere (L-PBF), procesul de topire selectivă cu laser (SLM), urmată de electroeroziune și frezare CNC pentru

controlul final al rugozității (Fig. 2-19). Combinația acestor trei proceduri de fabricație a fost aleasă special pentru a compensa limitările pe care fiecare metodă le are în mod intrinsec. Fiecare paletă a fost fabricată monobloc pentru a permite o tranziție lină între suprafața paletelor și regiunea de control. Ținând cont de dimensiunea redusă și distribuția orificiilor în regiunea de control, metodele tradiționale de găurire au fost abandonate. Paletele au fost supuse unui control dimensional amănunțit sub forma unei analize a rugozității suprafeței și s-a înregistrat o abatere maximă de $\pm 0,04$ mm de la modelul CAD, confirmând astfel precizia procesului de fabricație. În afară de calitatea ridicată a suprafeței obținută prin metoda de fabricație, studiul din Capitolul 7 este, de asemenea, foarte relevant pentru industria aeronautică, unde superaliajele pe bază de nichel sunt utilizate în mod obișnuit la fabricația paletelor. Configurația finală a paletelor cu control pasiv este caracterizată de următoarele specificații geometrice:

- paleta principală include două zone de control cu plăci perforate. Prima este situată în zona bordului de atac de pe intrados și are o lungime de 12 mm cu 8x7 orificii dispuse în formă de tablă de șah. A doua regiune de control este situată la jumătatea coardei pe extrados și are o lungime de 27 mm cu 13x8 orificii. Pentru ambele regiuni de control, adâncimea cavității este de 2 mm
- paleta secundară include două regiuni de control identice cu plăci perforate, ambele situate la jumătatea coardei. Lungimea regiunii de control este de 22 mm, cu orificii 11x8 dispuse în formă de tablă de șah. Adâncimea cavității de control este de 2 mm.

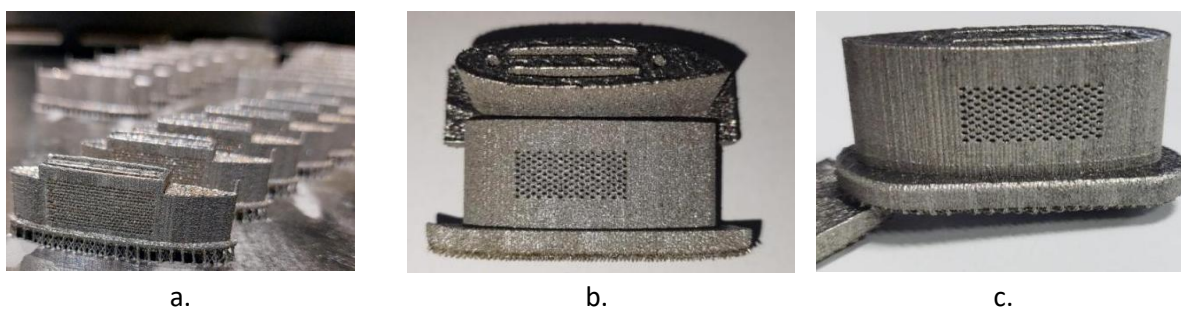
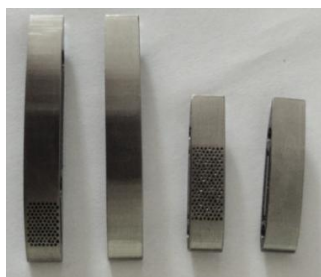


Fig. 2-18 Paletele liniarizate de difuzor pe parcursul procesului de fabricație
a. iterația 1 b. iterația 2 c. iterația 3 (sursa: Capitol 7 [32])

Pe lângă fabricarea paletelor, care a fost esențială în dezvoltarea infrastructurii de testare din Capitolul 7, alinierea și etanșarea acestora față de pereții laterali ai reșei a fost, de asemenea, extrem de importantă pentru a asigura condiții de incidență adecvate pentru întreaga rețea. Alinierea a fost realizată printr-un model frezat în ferestrele de acces optic din cuarț, care reproduce fidel conturul paletelor (Fig. 2-20). Etanșarea cu ferestrele din cuarț s-a realizat cu două șuruburi din teflon (Fig. 2-21), care au și capacități de absorbție a vibrațiilor.

Înainte de punerea în funcțiune a infrastructurii, conducta de alimentare cu aer a fost instrumentată cu un senzor de presiune statică și un senzor de presiune totală (în zona adaptorului de admisie) și cu un debitmetru pentru a permite definirea precisă a viitoarelor condiții limită pentru simulările numerice utilizate pentru validare. Schema integrală a instalației de testare este prezentată în Fig. 2-22. Pentru a exploata accesul optic (Fig. 2-23), a fost utilizat un sistem Schlieren de tip Z pentru a surprinde caracteristicile curgerii în regiunea paletelor, cu accent pe gradientii de densitate ai undelor de șoc (Fig. 2-24). Înainte de testul de punere în funcțiune, a fost efectuată o verificare a întregii infrastructuri (Fig. 2-25).



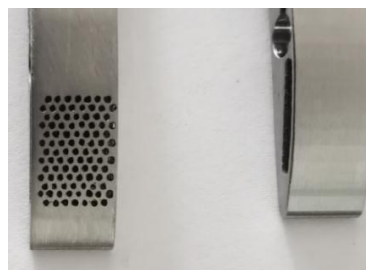
a.



b.



c.



d.

Fig. 2-19 Paletele în urma frezării pentru controlul rugozității

a. vedere de sus b. vedere laterală c. paleta principală cu control pasiv – etape de fabricație d. bordul de atac al paletii principale – fără control/cu control pasiv
(sursa: Capitol 7 [32])



Fig. 2-20 Paletele cu control pasiv montate pe fereastra de access optic din cuarț
(sursa: Capitol 7 [32])



Fig. 2-21 Paletele rețelei de difuzor și suruburile de ghidare și montaj
(sursa: Capitol 7 [32])

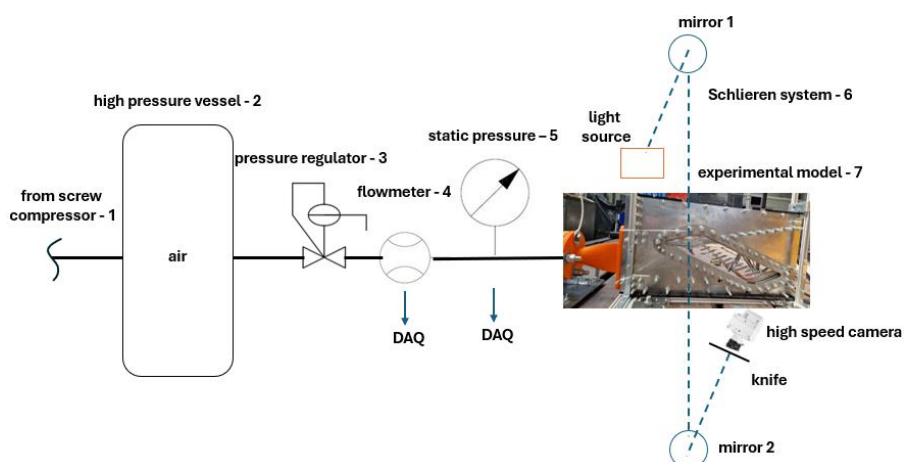


Fig. 2-22 Schema de instrumentare a instalației experimentale
(sursa: Capitol 7 [32])



Fig. 2-23 Vedere laterală a rețelei liniare în zona de access optic
(sursa: Capitol 7 [32])

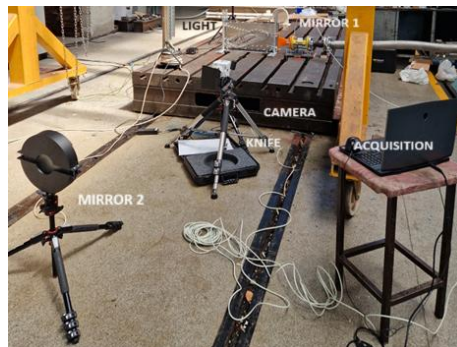


Fig. 2-24 Sistem Schlieren pentru vizualizarea curgerii
(sursa: Capitol 7 [32])



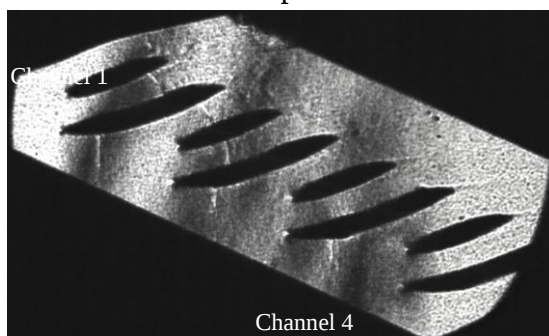
Fig. 2-25 Vedere de ansamblu a rețelei
(sursa: Capitol 7 [32])

În Capitolul 7 au fost efectuate o serie de teste preliminare campaniei experimentale finale, folosind exclusiv paletele de referință fără control aplicat, pentru a verifica dacă întreaga instalație, inclusiv instrumentarea, funcționează corect în conformitate cu specificațiile de proiectare. Au fost setate diferite presiuni statice ale manometrului de admisie cuprinse între 0,7 bar și 0,9 bar, rezultând mai multe tipuri de structur de unde de șoc, cu intensitate mai ridicată pe măsură ce presiunea a crescut. Undele de șoc au fost amplasate în canalele principale și secundare, precum și în apropierea bordului de atac al paletelor principale. Nu a fost înregistrată nicio defecțiune la sistemul de alimentare cu aer sau la achiziția de date.

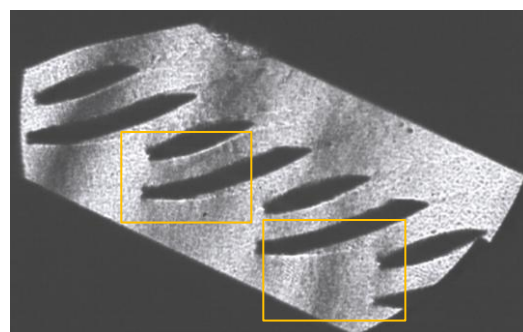
Rețeaua liniară de difuzor cu palete pusă în funcțiune în Capitolul 7 a fost utilizată în campania experimentală finală a prezentei teze, prezentată în Capitolul 8. Atât geometria de bază fără control aplicat pe palete, cât și geometria cu plăci perforate au fost studiate experimental la mai multe presiuni de admisie cuprinse între 0,7 bar și 0,9 bar relativ (Fig. 2-26 - Fig. 2-29). Au fost monitorizate și salvate presiunea statică de intrare și debitul masic în timpul testării. Accentul a fost pus pe analiza imaginilor Schlieren, cu scopul final de a evalua influența plăcii perforate asupra structurii undelor de șoc și asupra stratului limită.

Pentru toate regimurile testate în Capitolul 8, undele de șoc normale care apar în varianta de bază a rețelei, fără control, au fost transformate de strategia de control fie în structuri de comprimare oblică, cu intensitate mai mica, ancorate în regiunea de control, fie în trenuri de unde aeroacustice și mai slabe cu un anumit unghi în raport cu rețeaua (a se vedea chenarele dreptunghiulare din Fig. 2-26-Fig. 2-29). Un comportament diferit a fost observat pentru bordul de atac al paletelor principale la o presiune statică de 0,9 bar relativ la admisie. Unda de șoc normală din cazul de referință a fost transformată într-o structură de tip λ , tipică pentru funcționarea unui profil izolat. Acest lucru este justificat de lipsa unui al doilea perete în zona bordului de atac pentru a ghida complet curgerea. În ciuda faptului că plăcile perforate au

atenuat cu succes intensitatea undelor de șoc, au apărut probleme specifice legate de zonele de desprindere a curgerii ca rezultat direct al efectului de injecție din cavitatea de sub placa perforată, combinat cu rugozitatea sporită a zonei perforate. Desprinderea stratului limită este pusă în evidență de vizualizarea Schlieren în apropierea bordului de atac al paletelor principale și în zonele de control ale paletelor secundare.

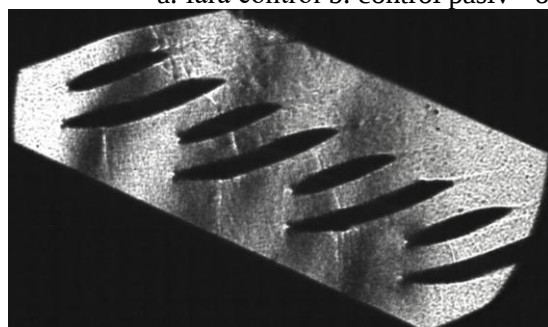


a.

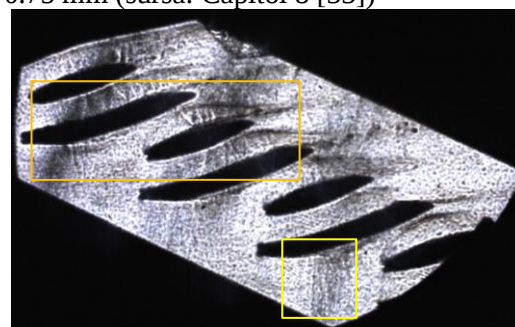


b.

Fig. 2-26 Imagini Schlieren – 0.7 bar presiune statică relativă la intrare
a. fără control b. control pasiv - orificii 0.75 mm (sursa: Capitol 8 [33])

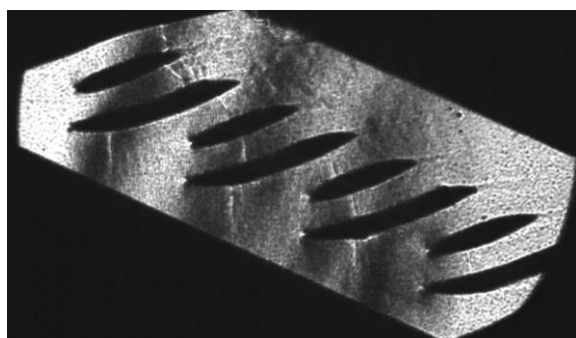


a.

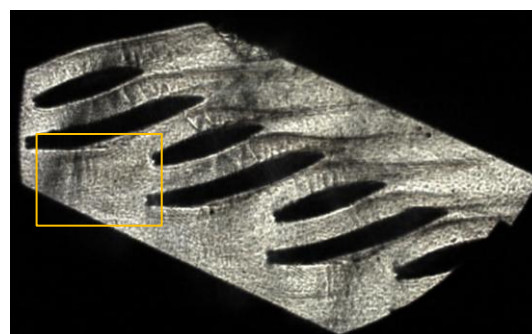


b.

Fig. 2-27 Imagini Schlieren – 0.8 bar presiune statică relativă la intrare
a. fără control b. control pasiv - orificii 0.75 mm (sursa: Capitol 8 [33])

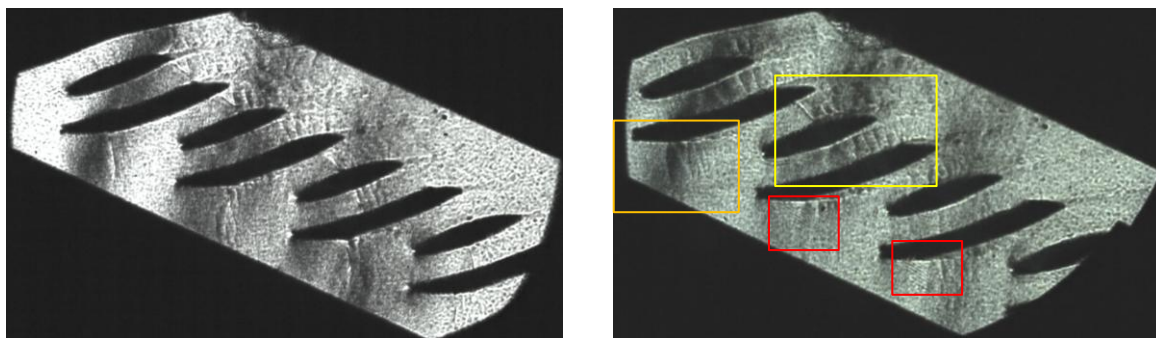


a.



b.

Fig. 2-28 Imagini Schlieren – 0.85 bar presiune statică relativă la intrare
a. fără control b. control pasiv - orificii 0.75 mm (sursa: Capitol 8 [33])



a.

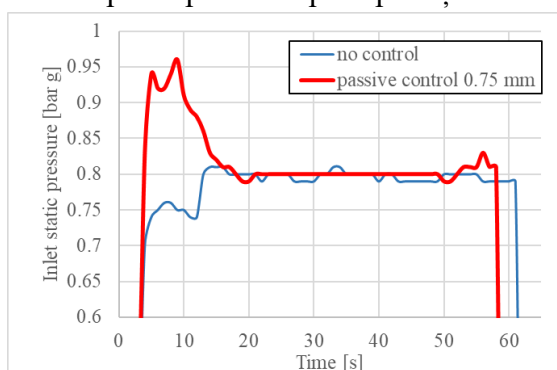
b.

Fig. 2-29 Imagini Schlieren – 0.9 bar presiune statică relativă la intrare
a. fără control b. control pasiv - orificii 0.75 mm (sursa: Capitol 8 [33])

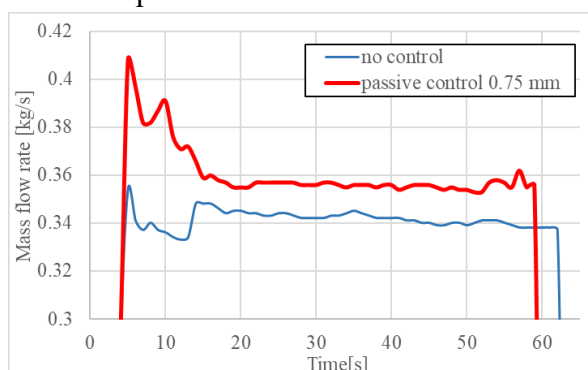
Rezultatele experimentale pentru presiunea de admisie de 0,8 bar relativ, cu control pasiv aplicat, au arătat o creștere de 4 % a debitului masic în comparație cu cazul de referință, cu condiții de admisie aproape identice din conducta de alimentare cu aer, după cum se arată în Fig. 2-30.

Rezultatele experimentale de la 0.8 bar au fost, de asemenea, validate numeric prin simulări CFD atât pentru cazul de referință, cât și pentru cel cu control pasiv. Condițiile numerice la limită au fost impuse folosind presiunea totală de intrare experimentală și presiunea statică atmosferică de la ieșire (Fig. 2-31 a). Domeniul de calcul a fost discretizat folosind Ansys Meshing într-o grilă nestructurată de 65 de milioane de celule cu îndesiri locale în regiunea rețelei de paletе, zona de control a plăcilor perforate și pereții laterali ai întregului domeniu (Fig. 2-31 b și c).

Imaginile Schlieren care pun în evidență gradientul de densitate (Figura 2-32) confirmă rezultatele experimentale, deoarece prezintă, de asemenea, o schimbare a structurii undelor de șoc dintr-o undă unică normal către trenuri de unde de compresie cu un unghi fix de ancorare față de suprafața paletelor. Rezultatele numerice au evidențiat, de asemenea, influența directă a plăcii perforate în desprinderii curgerii corespunzătoare regiunii de control. Aceasta a avut un impact direct asupra pierderilor de presiune totală, care nu au fost semnificativ diferite față de cele calculate în configurația de bază. Astfel, diminuarea pierderilor de presiune totală induse de undele de șoc a fost anulată de creșterea pierderilor vâscoase ca o consecință directă a utilizării plăcii perforate pe suprafețele aerodinamice ale paletelor.



a.



b.

Fig. 2-30 Mărimi măsurate experimental pentru cazul 0.8 bar presiune statică relativă
a. presiune statică la intrare b. debit masic (sursa: Capitol 8 [33])

În comparație cu modificarea structurii undelor de șoc folosind plăci perforate cu orificii plasate în linie, precum a fost arătat în Capitolele 4 și 5, placa perforată de tip tablă de șah din Capitolul 8 a transformat unde de șoc normale de intensitate mare în structuri de unde foarte regulate, de natură aeroacustică, cu intensitate scăzută, a căror înclinare a frontului de undă aproape coincide cu unghiul de așezare al paletelor în rețea (Fig. 2-33 și Fig. 2-34). Având în vedere că modelul de găuri urmează o dispunere eșalonată, de tip tablă de șah, cu rânduri alternante de orificii, este posibil ca lipsa unei suprafețe continue între rândurile adiacente de perforații, similară celei prezente în modelul cu orificii în linie, să fi înlesnit vizibilitatea fenomenului.

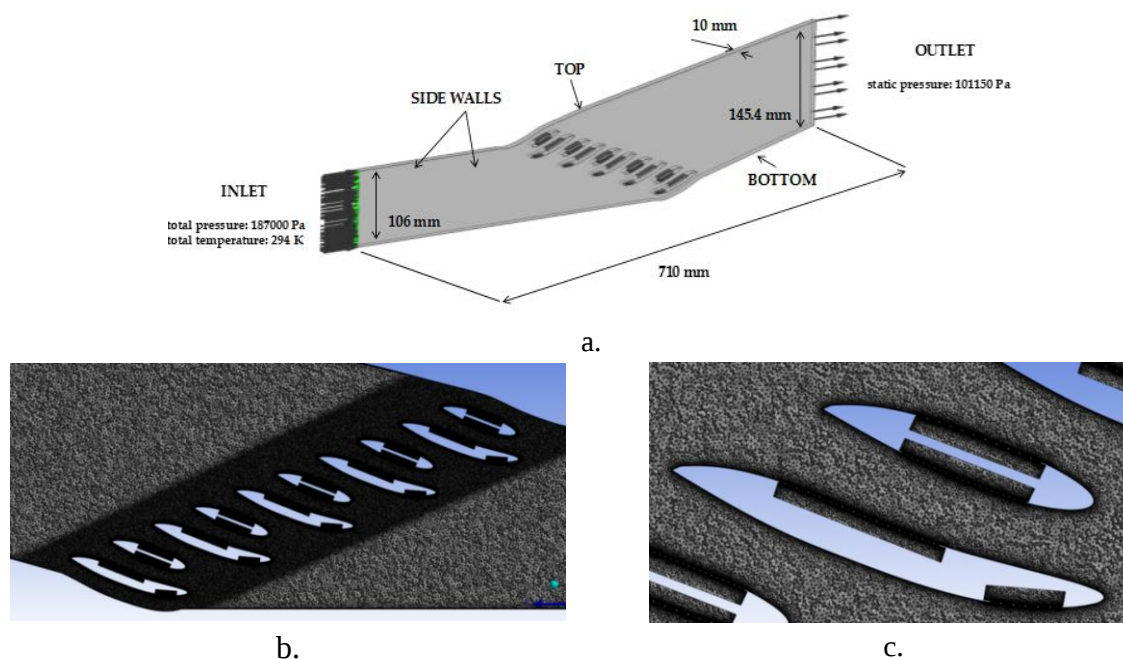


Fig. 2-31 Domeniul de calcul

a. ansamblu b. grilă de discretizare c. detaliu grilă de discretizare (placă perforată)
(sursa: Capitol 8 [33])

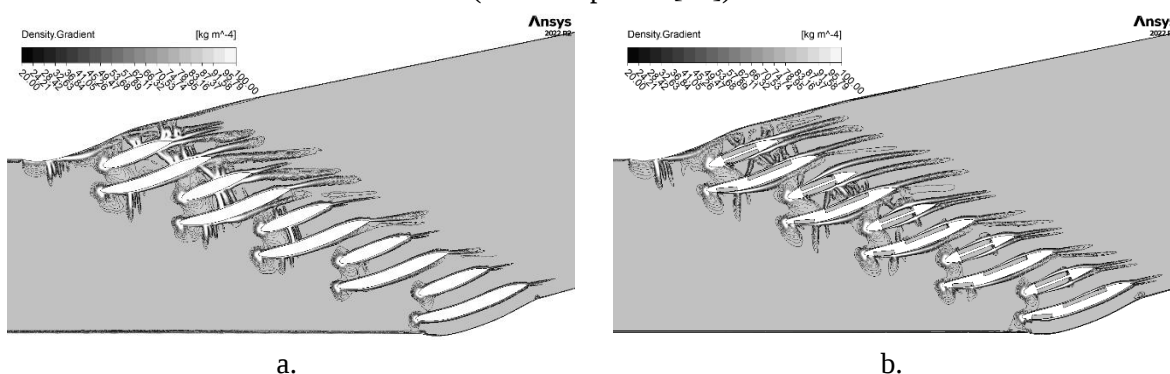


Fig. 2-32 Gradientul densității – plan la 50% din înălțimea canalului
a. fără control b. control pasiv (sursa: Capitol 8 [33])

Forma și regularitatea trenurilor de unde, menționate anterior, din vecinătatea regiunii de control a plăcii perforate au arătat un comportament diferit în comparație cu rezultatele obținute pe profile aerodinamice izolate în Capitolul 4. Pentru distribuția în linie a orificiilor, precum cea din Capitolul 4, punctul de apariție al undelor de șoc oblice se află pe suprafața profilului, între două rânduri de găuri. În plus, unghiul lor este dat de unda de șoc oblică anterioară care

se formează în locul unde de șoc normale inițiale (atunci când nu se aplică niciun control). Punctul final al tuturor undelor de șoc oblice mici se află pe a doua ramură a structurii de șoc de tip λ . În cazul dispunerii orificiilor tip tablă de șah, undele sunt orientate la un anumit unghi de la suprafața profilului, dar nu sunt atașate la suprafața însăși. În plus, undele nu au un capăt bine definit, ele pierzând din intensitate pe măsură ce se îndepărtează de suprafața perforată, acționând ca un model de rezonatoare acustice tubulare cu capăt deschis.

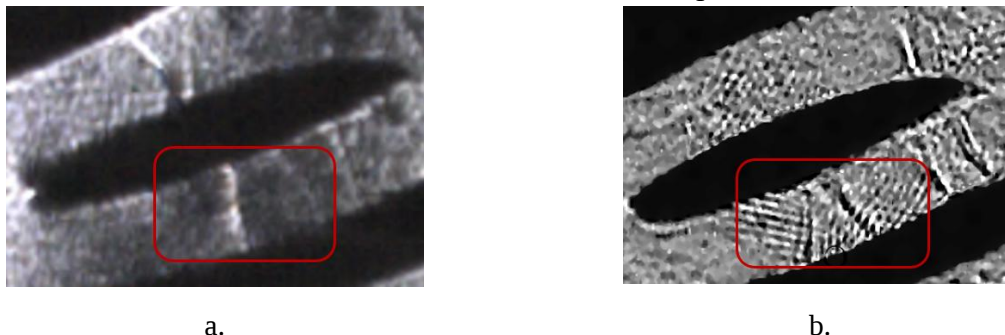


Fig. 2-33 Structura undelor de șoc – prima paletă secundară
a. fără control b. control pasiv (sursa: Capitol 8 [33])

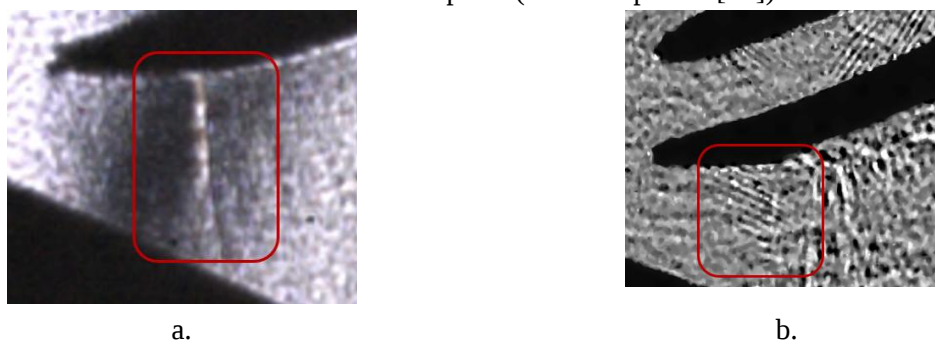


Fig. 2-34 Structura undelor de șoc – a doua paletă principală
a. fără control b. control pasiv (sursa: Capitol 8 [33])

În concluzie, datele experimentale care arată schimbarea intrinsecă a structurilor de unde de șoc normale în structuri cu unde regulate cu un unghi precis față de suprafața paletelor au fost susținute de o modelare analitică aero-acustică simplificată, prin aproximarea cavității de sub placa perforată ca rezonator Helmholtz. Din model a rezultat o lungime de undă de 1,048 mm, foarte apropiată de cea estimată din vizualizarea Schlieren, de 1.1 mm. În plus, o analiză optică a unghiului trenului de unde de compresiune în raport cu suprafața paletelor a indicat o valoare foarte apropiată a acestuia față de complementul unghiului de așezare în rețea a paletelor.

CAPITOLUL 3 CONCLUZII

3.1 Concluzii generale și elemente de noutate

Metoda de control pasiv care utilizează plăci perforate cu cavități de recirculare este aplicată în mod original în lucrare de față în configurații de rețele de difuzoare paletate, tipice pentru microturbomotoare. Conform literaturii științifice disponibile, tehnica de control pasiv cu plăci perforate a fost cercetată la scară largă pentru fenomenele de interacțiune strat limită – undă de șoc pentru aplicații de aerodinamică externă (profile izolate și pale de rotor de elicopter) sau pentru pereții ajutărilor și dispozitivelor de admisie supersonice. Toate aceste cercetări referitoare la plăcile perforate au constituit punctul de plecare al prezentei teze.

Lucrarea de față extinde eforturile de cercetare dedicate strategiei de control cu plăci perforate prin aplicarea acesteia la un nou mediu de lucru, și anume rețelele de palete, în care apar efecte specifice induse de pereții paletelor și canalele generate de aceștia. Pornind de la validarea conceptului de control aplicat unui profil izolat, se urmărește o metodologie de cercetare pentru validarea conceptului privind utilizarea plăcilor perforate în difuzoarele cu palete tipice pentru microturbomotoare. Prin urmare, caracterul inovator și original al acestei lucrări derivă direct din aplicarea unei tehnici deja existente de control al curgerii într-un mediu de operare nou, în care apar fenomene specifice dinamicii fluidelor la viteze mari de curgere. În plus, noutatea este, de asemenea, susținută de studiile parametrice aplicate profilelor NACA 0012 în configurație de rețea liniară privind dimensiunea orificiilor plăcilor perforate, care reprezintă un punct de plecare pentru studiile parametrice pentru acest tip de tehnică pasivă de control aplicată rețelilor de palete.

Prin atingerea obiectivelor prezentei teze, nivelul de maturitate tehnologică (TRL) a crescut de la 2 la 4 (a se consulta Fig. 3-1) prin testarea și validarea experimentală a unui demonstrator tehnologic care integrează un difuzor cu palete liniarizat cu un sistem de control pasiv cu plăci perforate. TRL 2 a fost susținut de studii CFD care susține beneficiile potențiale și fezabilitatea utilizării plăcilor perforate în difuzoarele cu palete. Conform studiilor de literatură, atunci când a fost începută prezenta lucrare, nu existau prototipuri fizice în domeniul mașinilor cu palete pentru a studia acest concept. Pentru a crește nivelul de maturitate, au fost efectuate studii experimentale preliminare fie cu profile aerodinamice izolate, fie cu configurații de profile aerodinamice dispuse în rețea folosind un tunel aerodinamic de mare viteză pentru a evalua în detaliu efectul plăcilor perforate cu orificii de diferite dimensiuni asupra structurii undelor de șoc și asupra bilanțului global de pierderi de presiune totală.

Plecând de la un difuzor paletat de referință, fără control, a fost obținută prin liniarizare o rețea de difuzor cu palete. Această rețea a fost proiectată, fabricată și testată ca parte a acestei teze. Rețeaua liniară a fost proiectată pentru a permite vizualizarea curgerii împreună cu fenomenele de interacțiune undă de șoc – strat limită asociate, utilizând tehnica Schlieren. Fabricarea aditivă din Inconel 625 a prototipurilor de palete cu regiuni de control cu plăci perforate a vizat suprafețe și regiuni de control de înaltă calitate (orificii și cavități), sprijinind dezvoltarea unei metodologii complete de fabricare a componentelor cu regiuni de control perforate.

Datele experimentale măsurate în timpul campaniei finale de testare, precum și validarea cu rezultatele numerice, susțin fezabilitatea și performanța strategiei cu plăci perforate utilizate în difuzoarele cu palete. Utilizarea regiunilor de control perforate a condus la o reducere a

intensității undelor de șoc și la o creștere cu 4% a debitului prin sistemul cu control pasiv în comparație cu cazul classic, fără control. Acest lucru sugerează că tehnica de control poate fi în continuare cercetată în medii relevante de difuzor paletat cu geometrie inelară pentru un TRL și mai ridicat. În plus, rezultatele de lucrarea de față demonstrează că tehnologia este validată în condiții de laborator și poate fi considerată un punct de plecare pentru dezvoltarea și scalarea ulterioară.

3.2 Contribuții personale

Pentru atingerea obiectivelor declarate în lucrarea de față, au fost definite activități cu rezultate măsurabile care, în cele din urmă, conduc la o serie de contribuții personale ce vizează comunitatea științifică a microturbomotoarelor. După cum se va arăta în următoarele paragrafe, contribuțiile personale (PC) sunt strâns legate de obiectivele specifice (SO).

Pe de o parte, contribuțiile personale sunt legate de validarea conceptului de control pasiv cu plăci perforate atunci când acesta este aplicat configurațiilor de rețea și, în special, difuzoarelor cu palete pentru compresoarele centrifugale ale microturbomotoarelor:

- **Implementarea strategiilor avansate de generare a grilei de calcul structurate pentru modelarea numerică a plăcilor perforate (PC1).** Generarea unei grile structurate pentru regiunea de control a plăcilor perforate a condus la dificultăți intrinseci de discretizare în Capitolul 3. Celulele reprezentând fluidului din cavitatea de control au fost generate ca extrudare directă a elementelor de pe suprafața aerodinamică, din zona plăcii perforate. Orificiile „plăcii perforate” au fost ulterior definite numeric ca interfețe permeabile, fluid-fluid. Simulările din Capitolul 3 au demonstrat numeric schimbarea structurii undelor de șoc atunci când plăcile perforate sunt aplicate difuzoarelor paletate din cadrul microturbomotoarelor (SO1).
- **Validare conceptului de control pasiv cu plăci perforate pe profile isolate NACA0012 cu dimensiuni diferite ale orificiilor (PC2).** Studiul din Capitolul 4 a servit drept validare inițială a tehnicilor experimentale și numerice adecvate utilizate pentru a investiga efectul plăcilor perforate asupra modificării structurii undelor de șoc în cazul curgerilor de mare viteză în jurul unui profil aerodinamic izolat. Plăcile perforate au arătat un impact direct asupra structurii undelor de șoc: unda de șoc normală puternică a fost transformată într-o structură de șoc de tip λ , pentru orificiile mici, sau într-un tren de unde de compresiune oblice slabe, pentru orificiile mari. Studiile privind plăcile perforate cu orificii variabile aplicate la profile izolate, inclusiv metodologia de fabricație, au constituit punctul de plecare pentru punerea în aplicare a tehnicii de control pasiv în rețea, pentru a îndeplini SO2.
- **Validarea conceptului de control pasiv cu plăci perforate pe profile NACA0012 în rețea, cu dimensiuni diferite ale orificiilor (PC3).** Configurația de rețea de profile NACA 0012 din Capitolul 5 a reprezentat un studiu intermediar de validare a controlului curgerii cu plăci perforate între profilul aerodinamic izolat din Capitolul 4 și rețeaua de difuzor paletat din Capitolul 8. Plăcile perforate cu orificii cu dimensiuni în intervalul 0,5-1,2 mm au fost aplicate în mod original atât pe extradusul, cât și pe intradusul a trei aripi NACA 0012 dispuse în rețea. Rezultatele numerice, împreună cu imaginile Schlieren, au arătat o tranziție de la unde de șoc normale puternice la unde de

compresiune oblice mai slabe de tip „X” a căror complexitate depinde de dimensiunea orificiului (SO2).

- **Validarea tehnicii de control pasiv cu plăci perforate pe o rețea liniară de difuzor pletat (PC4).** Tehnica de control pasiv cu plăci perforate aplicată la paletetele tipice ale unui difuzor paletat a fost cercetată experimental și numeric în Capitolul 8. Rezultatele au confirmat principiul de funcționare al metodei de control și au evidențiat o schimbare a structurii undelor de șoc, de la o undă de șoc normală, puternică la structuri de unde de compresiune oblice mai slabe ancorate în regiunea de control, sau la trenuri de unde aeroacustice cu intensitate și mai redusă, cu un anumit unghi față de suprafața paletetei, ce coincide cu unghiul complementar al rețelei. Rezultatele experimentale au arătat o creștere de 4 % a debitului masic în cazul cu control pasiv în comparație cu cazul de referință, fără control aplicat (SO5). Pe baza rezultatelor privind studiul parametric al dimensiunii orificiilor plăcilor perforate asupra rețelei NACA 0012 din Capitolul 5, configurațiile finale ale paletetelor difuzorului liniarizat care au obținut efecte pozitive de control pasiv au rezultat ca un compromis între capacitățile de fabricație, costuri și capacitatea de control a plăcii perforate. În comparație cu dispunerea în linie a orificiilor utilizată în Capitolele 4 și 5, placa perforată de tip tablă de șah, utilizată în Capitolul 8, a redistribuit undele de șoc de intensitate ridicată în formațiuni de unde foarte regulate cu intensitate scăzută, care au evidențiat structuri diferite față de cele pentru profilele izolate. Acest lucru a fost atribuit fenomenelor aeroacustice ale cavității de control, care au fost confirmate de o modelare analitică validată în raport cu datele experimentale disponibile.
- **Elaborarea de corelații de anteproiectare pe baza bazelor de date de microturbomotoare și microcompresoare centrifugale (PC5).** Pe baza datelor de performanță disponibile pentru turbomotoare și microcompresoare centrifugale, au fost prezentate în Anexele C și D corelații cu valori ridicate ale coeficientului de determinare R^2 , care au fost utilizate în Capitolul 2. Toate corelațiile stabilite statistic servesc fazelor de anteproiectare în care o serie de valori inițiale impuse se bazează, în principal, pe literatura existentă.

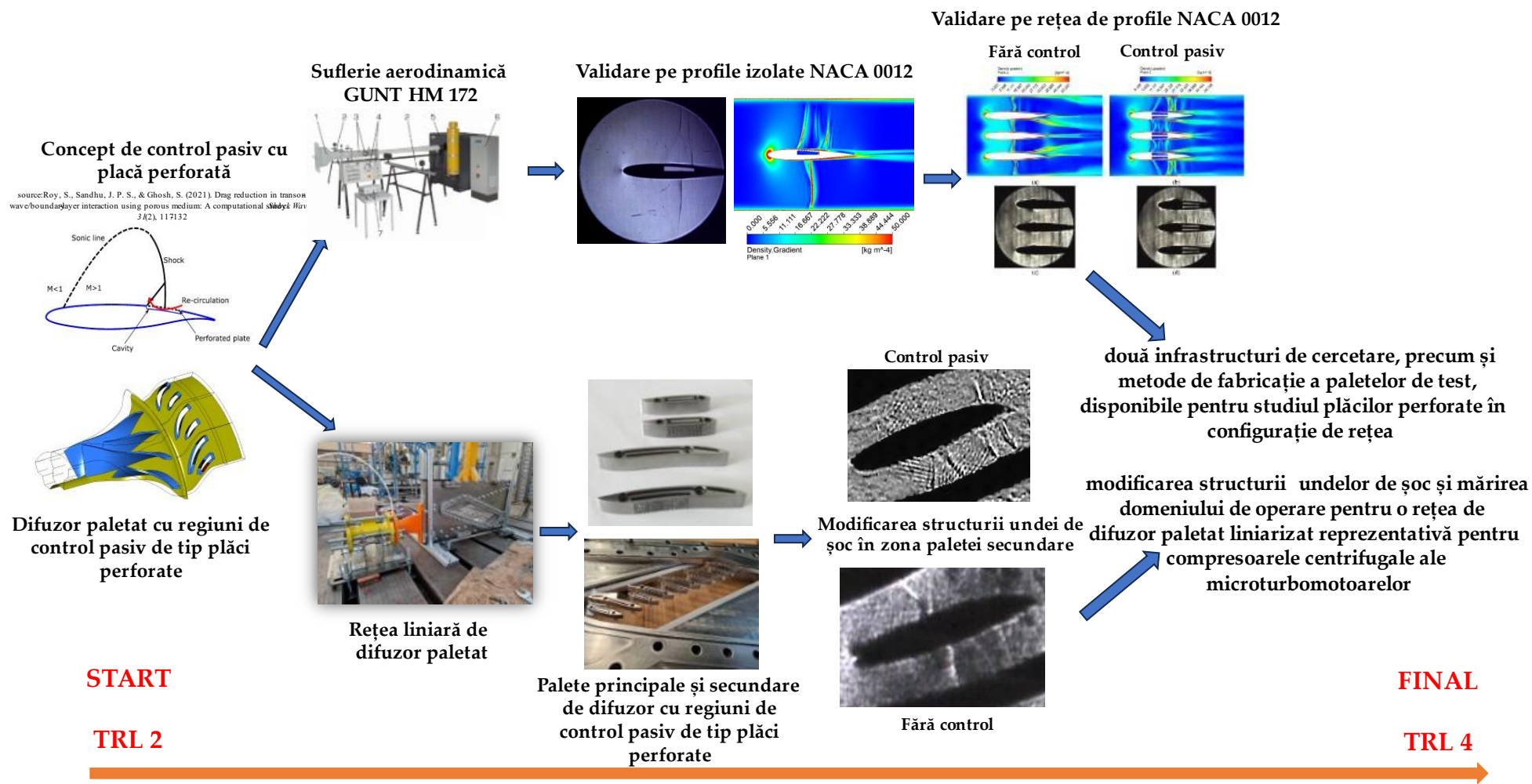


Fig. 3-1 Creșterea nivelului de maturitate tehnologică (TRL)

Pe de altă parte, contribuțiile personale sunt legate de activitățile experimentale, și anume dezvoltarea infrastructurilor de testare și a metodologiilor de cercetare a strategiei de control pasiv cu plăci perforate în configurații de rețea specifice difuzoarelor paletate pentru microturbomotoare:

- **Analiza tehnicilor de fabricație dedicate profilelor aerodinamice simetrice ce includ tehnica de control pasiv cu plăci perforate (PC6).** Studiul din Capitolul 4 a implicat fie fabricarea multibloc (profil aerodinamic tăiat cu jet de apă și placă perforată din aluminiu găurită cu laser sau profil aerodinamic fabricat aditiv din PLA cu placă perforată fabricată aditiv din PLA), fie abordări monobloc (fabricație aditivă prin topire selectivă cu laser (SLM) utilizând Inconel 625 sau fabricație aditivă din PLA). Profilele aerodinamice finale monobloc fabricate aditiv din PLA au arătat o precizie acceptabilă a orificiilor plăcii perforate în intervalul 0,5 mm - 1,2 mm. Rezultatele din Capitolul 4 au susținut în mare măsură realizarea SO2.
- **Adaptarea unui tunel aerodinamic de mare viteză pentru a testa o rețea liniară de profile NACA 0012 (PC7).** Tunelul aerodinamic GUNT HM172, în configurația originală, permite testarea unui singur obiect, fie aerodinamic, fie corp de tip 'bluff body'. Activitatea din Capitolul 5 a implicat fabricarea de noi ferestre de acces optic cu mecanisme de ancorare, asigurând în același timp capacitățile de etanșeitate ale întregii instalații. Aceasta din urmă a fost extrem de importantă pentru a minimiza eroarea experimentală în măsurarea distribuțiilor de presiune statică și în funcționarea plăcii perforate, care implică recircularea fluidului printr-o cavitate plasată dedesubtul plăcii perforate. Adaptarea tunelului aerodinamic pentru a monta rețele de profile a contribuit la îndeplinirea obiectivului SO2.
- **Punerea în funcțiune a unei rețele liniare dedicate testării difuzoarelor paletate ale microturbomotoarelor (PC8).** Instalația proiectată în Capitolul 6 și pusă în funcțiune în Capitolul 7 (SO3) poate testa o gamă largă de geometrii ale paletelor, de la cele de bază, fără control, la cele controlate pasiv cu ajutorul plăcilor perforate. Prin metode rapide de fabricație a paletelor în conformitate cu metodologiile de fabricație dezvoltate în Capitolul 7, se pot efectua studii experimentale ample. În plus, proiectarea versatilă a întregii instalații de testare permite îmbunătățirea ulterioară a tehnicilor experimentale aplicate, de la metode optice la măsurarea cu frecvențe mari de achiziție a presiunii statice la pereți.
- **Analiza tehnicilor de fabricație dedicate paletelor liniarizate de difuzor cu tehnica de control pasiv cu plăci perforate aplicată pe suprafețele lor aerodinamice (PC9).** Studiul din Capitolul 7 a utilizat tehnologia de topire cu laser pe pat de pulbere (L-PBF), metoda de topire selectivă cu laser (SLM) a superaliajului Inconel 625 specific mașinilor cu palete. Această metodă de fabricație a fost succedată de mai multe tehnici de postprocesare, de la sablare la electroeroziune și frezare de înaltă precizie. Procedul final de fabricație pentru paletele liniarizate de difuzorului de microturbomotor (SO4) a

implicat tehnologia SLM utilizând Inconel 625 urmată de electroeroziune și frezare de înaltă precizie. Precizia obținută față de modelul CAD ideal a fost de 0,04 mm. Întreaga metodologie de proiectare și fabricație dezvoltată în lucrarea de față servește drept referință pentru viitoare studii parametrice privind caracteristicile geometrice ale plăcilor perforate, permițând fabricarea rapidă, de înaltă calitate și cu costuri reduse a paletelor.

PUBLICAȚII ȘI PROIECTE DE CERCETARE

I. Publicații în jurnale WOS în domeniul tezei de doctorat

- **Gall, M.**, Dumitrescu, O., Drăgan, V., & Crunțeanu, D. E. (2024). Effects of Perforated Plates on Shock Structure Alteration for NACA0012 Airfoils. *Inventions*, 9(2), 28, <https://doi.org/10.3390/inventions9020028>; WOS:001210107500001; ISSN: 2411-5134
- **Gall, M.**, Dumitrescu, O., Drăgan, V., & Crunțeanu, D. E. (2024). Effects of Perforated Plates on Shock Structure Alteration for NACA0012 Cascade Configurations. *Inventions*, 9(5), 110, <https://doi.org/10.3390/inventions9050110>; WOS:001340920700001; ISSN: 2411-5134
- **Gall, M.**, Drăgan, V., Dumitrescu, O., Prisăcariu, E. G., Condruz, M. R., Paraschiv, A., Petrescu, V., & Vlăduț, M. (2024). Design, Fabrication, and Commissioning of Transonic Linear Cascade for Micro-Shock Wave Analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5), 201, <https://doi.org/10.3390/jmmp8050201>; WOS:001340893800001; ISSN: 2504-4494
- Dumitrescu, O., **Gall, M.**, & Drăgan, V. (2023). A Three-Dimensional Design to Study the Shock Waves of Linear Cascade with Reduced Mass Flow Requirements. *Applied Sciences*, 13(19), 11029, <https://doi.org/10.3390/app131911029>; WOS:001114360800001; ISSN: 2076-3417
- Drăgan, V., Dumitrescu, O., **Gall, M.**, Prisăcariu, E. G., & Gherman, B. (2024). Experimental Identification of a New Secondary Wave Pattern in Transonic Cascades with Porous Walls. *Aerospace*, 11(11), 946, <https://doi.org/10.3390/aerospace11110946>; WOS:001363587000001; ISSN: 2226-4310

II. Publicații în jurnale WOS în domenii conexe tezei de doctorat

- Cican, G., **Gall, M.**, Bogoi, A., Deaconu, M., Crunțeanu, D.E. (2023) Experimental Investigation of a Micro Turbojet Engine Chevrons Nozzle by Means of the Schlieren Technique. *Inventions*, 8, 145, <https://doi.org/10.3390/inventions8060145>; WOS:001130908000001; ISSN: 2411-5134
- Bogoi, A., Cican, G., **Gall, M.**, Totu, A., Crunțeanu, D.E., Levențiu, C. (2025) Comparative Study of Noise Control in Micro Turbojet Engines with Chevron and Ejector Nozzles Through Statistical, Acoustic and Imaging Insight. *Applied Sciences*, 15, 394, <https://doi.org/10.3390/app15010394>; WOS:001393489200001; ISSN: 2076-3417

III. Publicații în jurnale BDI în domeniul tezei de doctorat

- **Gall, M.,** Dumitrescu, O., Drăgan, V., Gherman, B., & Crunțeanu, D.E. (2023, October). Effects of Perforated Plates on the Performance of Vaned Diffusers for Microgas Turbines. In *2023 11th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 1-5). IEEE, <https://doi.org/10.1109/CIEM58573.2023.10349776>; ISBN:979-8-3503-4078-5
- **Gall, M.,** Drăgan, V. (2022) Vaned Diffuser Numerical Investigation for Microjet Engine, *Scientific Journal TURBO*, vol. IX (2022), no. 1, https://comoti.ro/wp-content/uploads/2022/12/11.Scientific-Journal-Turbo-Vol-IX_1_2022.pdf; ISSN (online): 2559-608X

IV. Proiecte în care autorul tezei de doctorat a fost implicat ca membru în echipă

- PN-III-CERC-CO-PED-3-2021 apel de proiect PED (Proiect Experimental Demonstrativ) finanțat de Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării (UEFISCDI): “**Operating range augmentation system through porous walls for centrifugal compressors**”, acronim SPACELESS, grant numărul 717PED/2022

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] The European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en accessed on 27th October 2023
- [2] Aircraft Micro Turbine Engines Market, https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/aircraft-micro-turbine-engines-market-248924999.html?gclid=Cj0KCQiArt6PBhCoARIsAMF5wajZnXK2WBYc_RfSzGQcM8xG_GVRLkVFl7zRWvYYTpEq3yxxQLhltqZ0aA accessed on 12th February 2022
- [3] Marcellan, A. (2015). An exploration into the potential of microturbine based propulsion systems for civil Unmanned Aerial Vehicles, MSc Thesis, TU Delft, Thesis number = 030#15#MT#FPP
- [4] Decuypere, R., & Verstraete, D. (2005). Micro turbines from the standpoint of potential users. *VKI LS on micro gas turbines*, Educational Notes RTO-EN-AVT-131, Paper 15, pp. 15-1-15-14, <http://myexs.ru/wp-content/uploads/2012/04/EN-AVT-131-15.pdf>
- [5] Burger, C. J. (2016). *Design procedure of a compact crossover diffuser for micro gas turbine application* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University), ISSN-L 2310-7855, <http://hdl.handle.net/10019.1/98634>
- [6] Dodge, J. L., Bush, D. B., Pechuzal, G. A., & Ravindranath, A. (1987). High efficiency transonic mixed-flow compressor method and apparatus. *U.S. Patent No. 4,678,398*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [7] Tiainen, J., Grönman, A., Jaatinen-Värrä, A., & Backman, J. (2017). Flow control methods and their applicability in low-Reynolds-number centrifugal compressors—a review. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 3(1), 2, <https://doi.org/10.3390/ijtp3010002>
- [8] Skoch, G. J. (2005). Experimental investigation of diffuser hub injection to improve centrifugal compressor stability. *J. Turbomach.*, 127(1), 107-117, <https://doi.org/10.1115/1.1812779>
- [9] Galloway, L., Spence, S., In Kim, S., Rusch, D., Vogel, K., & Hunziker, R. (2018). An investigation of the stability enhancement of a centrifugal compressor stage using a porous throat diffuser. *Journal of Turbomachinery*, 140(1), 011008, <https://doi.org/10.1115/1.4038181>
- [10] Galloway, L., Rusch, D., Spence, S., Vogel, K., Hunziker, R., & Kim, S. I. (2018). An investigation of centrifugal compressor stability enhancement using a novel vaned diffuser recirculation technique. *Journal of Turbomachinery*, 140(12), 121009, <https://doi.org/10.1115/1.4041601>
- [11] Malael, I., Bucur, I. O., & Dragan, V. (2020). 2.5 D les simulation of an airfoil shock wave reduction by using porous media. *Aerospace Research in Bulgaria*, 32, 122-133, <https://doi.org/10.3897/arb.v32.e11>
- [12] Gunasekaran, H., Thangaraj, T., Jana, T., & Kaushik, M. (2020). Effects of wall ventilation on the shock-wave/viscous-layer interactions in a Mach 2.2 intake. *Processes*, 8(2), 208, <https://doi.org/10.3390/pr8020208>
- [13] Doerffer, P., & Szulc, O. (2007). Shock wave strength reduction by passive control using perforated plates. *Journal of Thermal Science*, 16, 97-104, <https://doi.org/10.1007/s11630-007-0097-z>.
- [14] Sasoh, A., Matsuoka, K., Nakashio, K., Timofeev, E., Takayama, K., Voinovich, P., ... & Makino, Y. (1998). Attenuation of weak shock waves along pseudo-perforated walls. *Shock Waves*, 8, 149-159, <https://doi.org/10.1007/s001930050108>
- [15] Lee, B.H.K. (2001) Self-sustained shock oscillations on airfoils at transonic speeds. *Progress in Aerospace Sciences*, 37(2), pp.147-196, [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(01\)00003-3](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(01)00003-3)
- [16] Raghunathan, S., & Mabey, D. (1986, January). Passive shockwave boundary layer control experiments on a circular arc model. In *24th Aerospace Sciences Meeting* (p. 285), <https://doi.org/10.2514/6.1986-285>

- [17] Roy, S., Sandhu, J. P. S., & Ghosh, S. (2021). Drag reduction in transonic shock-wave/boundary-layer interaction using porous medium: a computational study. *Shock Waves*, 31(2), 117-132, <https://doi.org/10.1007/s00193-021-01009-7>
- [18] Hamid, M. A., Hasan, A. T., Ali, M., Mitsutake, Y., Setoguchi, T., & Yu, S. (2016). Unsteady transonic flow control around an airfoil in a channel. *Journal of Thermal Science*, 25, 117-122, <https://doi.org/10.1007/s11630-016-0841-3>
- [19] Doerffer, P., & Szulc, O. (2006). Shock wave smearing by wall perforation. *Archives of Mechanics*, 58(6), 543-573, <https://am.ippt.pan.pl/index.php/am/article/view/228>
- [20] Raghunathan, S., Gray, J., & Cooper, R. (1987, January). Effect of inclination of holes on passive shock wave boundary layer control. In *25th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 437), <https://doi.org/10.2514/6.1987-437>
- [21] Zater, C., Bahi, L. (2024) Passive control of shock wave/turbulent boundary layer interaction using low permeability wall ventilation over a supercritical RAE-2822 airfoil, *Thermophysics and Aeromechanics*, 31, 583–597, <https://doi.org/10.1134/S086986432403020X>
- [22] Bohning, R., and Doerffer, P. (1995, December) Wind tunnel tests of shock/boundary layer interaction with passive control porous wall investigation and numerical simulation of the wind tunnel tests, *University of Karlsruhe final Report EUROSHOCK TR AER 2-92-49/1.5*
- [23] Raghunathan, S. (1987). Effect of porosity strength on passive shock-wave/boundary-layer control. *AIAA journal*, 25(5), 757-758, <https://doi.org/10.2514/3.9693>
- [24] Egon, S., Delery, J., Fulker, J., Wolfgang, G. (1997) EUROSHOCK—Drag reduction by Passive Shock Control, *Results of the Project EUROSHOCK*, AER2-CT92-0049 Supported by the European Union, 1993–1995; European Union: Brussels, Belgium, 1997; Volume 56, ISBN 978-3-322-90713-4
- [25] Savu, G. (1983). Suppression of shocks on transonic airfoils. In *14th International Symposium on Shock Tube and Wave*, Sydney, Australia, pp. 92-101
- [26] Szulc, O., Doerffer, P., Flaszynski, P., & Suresh, T. (2020). Numerical modelling of shock wave-boundary layer interaction control by passive wall ventilation. *Computers & Fluids*, 200, 104435, ISSN 0045-7930, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104435>
- [27] Gall, M., Drăgan, V. (2022) VANED DIFFUSER NUMERICAL INVESTIGATION FOR MICROJET ENGINE, *Scientific Journal TURBO*, vol. IX (2022), no. 1, https://comoti.ro/wp-content/uploads/2022/12/11.Scientific-Journal-Turbo-Vol-IX_1_2022.pdf
- [28] Gall, M., Dumitrescu, O., Drăgan, V., Gherman, B., & Crunțeanu, D. E. (2023, October). Effects of Perforated Plates on the Performance of Vaned Diffusers for Microgas Turbines. In *2023 11th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)* (pp. 1-5). IEEE, <https://doi.org/10.1109/CIEM58573.2023.10349776>
- [29] Gall, M., Dumitrescu, O., Drăgan, V., & Crunțeanu, D. E. (2024). Effects of Perforated Plates on Shock Structure Alteration for NACA0012 Airfoils. *Inventions*, 9(2), 28, <https://doi.org/10.3390/inventions9020028>
- [30] Gall, M., Dumitrescu, O., Drăgan, V., & Crunțeanu, D. E. (2024). Effects of Perforated Plates on Shock Structure Alteration for NACA0012 Cascade Configurations. *Inventions*, 9(5), 110, <https://doi.org/10.3390/inventions9050110>
- [31] Dumitrescu, O., Gall, M., & Drăgan, V. (2023). A Three-Dimensional Design to Study the Shock Waves of Linear Cascade with Reduced Mass Flow Requirements. *Applied Sciences*, 13(19), 11029, <https://doi.org/10.3390/app131911029>
- [32] Gall, M., Drăgan, V., Dumitrescu, O., Prisăcariu, E. G., Condruz, M. R., Paraschiv, A., Petrescu, V., & Vlăduț, M. (2024). Design, Fabrication, and Commissioning of Transonic Linear Cascade for Micro-Shock Wave Analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5), 201, <https://doi.org/10.3390/jmmp8050201>
- [33] Drăgan, V., Dumitrescu, O., Gall, M., Prisăcariu, E. G., & Gherman, B. (2024). Experimental Identification of a New Secondary Wave Pattern in Transonic Cascades with Porous Walls. *Aerospace*, 11(11), 946, <https://doi.org/10.3390/aerospace11110946>
- [34] Cican, G., Gall, M., Bogoi, A., Deaconu, M., & Crunțeanu, D. E. (2023). Experimental Investigation of a Micro Turbojet Engine Chevrons Nozzle by Means of the Schlieren Technique. *Inventions*, 8(6), 145, <https://doi.org/10.3390/inventions8060145>

- [35] Bogoi, A., Cican, G., **Gall, M.**, Totu, A., Crunțeanu, D. E., & Levențiu, C. (2025). Comparative Study of Noise Control in Micro Turbojet Engines with Chevron and Ejector Nozzles Through Statistical, Acoustic and Imaging Insight. *Applied Sciences*, 15(1), 394, <https://doi.org/10.3390/app15010394>
- [36] Dumitrescu, O., et al., Technical Report COMOTI, Project 717PED contract ‘Operating range augmentation system through porous walls for centrifugal compressors – SPACELESS’, Etapa I. Fabricatie compresor centrifugal - Faza 1. Campanie experimentală - Faza 1, P.V.A. nr. 89/24.11.2022
- [37] Dumitrescu, O., et al., Technical Report COMOTI, Project 717PED contract ‘Operating range augmentation system through porous walls for centrifugal compressors – SPACELESS’, Etapa II. Fabricatie compresor centrifugal - Faza 2. Campanie experimentală - Faza 2. Diseminarea rezultatelor - Faza 1, P.V.A. nr. 74/27.11.2023
- [38] Dumitrescu, O., et al., Technical Report COMOTI, Project 717PED contract ‘Operating range augmentation system through porous walls for centrifugal compressors – SPACELESS’, Etapa III. Campanie experimentală - Faza 3. Diseminarea rezultatelor - Faza 2, P.V.A. nr. 29/13.06.2024